

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN
SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA
GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖMER SAFA GÜR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

EYLÜL 2023

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN
SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA
GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER SAFA GÜR

36203621065

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

EYLÜL 2023

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN
SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA
GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASININ ETKİSİ

Tezi Hazırlayan: Ömer Safa GÜR

Yüksek Lisans Tezi



TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a,

Çalıőmalarımda ayrıca yardımcı olan Sayın İnşaat Mühendisi Eőref AZEMİ ve İnşaat Mühendisi Sayın Erkay KUTLUSOY'a,

Hayatımın her evresinde olduğu gibi bu çalıőmam süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen ve aldığım her kararda yanımda olan ailem; bu çalıőmayı ithafen yazdığım annem Yasemin GÜR, babam Ahmet GÜR ve canım ablam Yüksek Elektrik Elektronik Mühendisi Merve GÜR'e

teşekkür ederim.

Bu çalışmanın literatüre katkıda bulunmasını dilerim.

Ömer Safa GÜR

İNşaat Mühendisi

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum "Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Sülfat Dayanıklılığına Genleştirilmiş Perlit Agregasının Etkisi" başlıklı çalışmanın tamamen tarafımdan yazıldığını ve bilimsel ahlak ve geleneklere uygun olarak yürütüldüğünü onaylarım. Tez çalışmamda yer alan tüm bilgiler, kaynak gösterme kurallarına uygun olarak hem metin içinde hem de kaynakça bölümünde belirtilen referanslardan derlenmiştir. Bu açıklamayı onurumla doğruluyorum.

Ömer Safa GÜR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1 Geopolimer	2
2.1.1 Taze geopolimer harcın özellikleri.....	4
2.1.1.1 İşlenebilirlik.....	4
2.1.1.2 Zaman ayarı	5
2.1.1.3 Taze geopolimer harcın sıcaklığı.....	6
2.1.2 Geopolimer harçların fiziksel özellikleri.....	7
2.1.3 Geopolimer harcın mekanik performansı.....	8
2.1.3.1 Basınç dayanımı	8
2.1.3.2 Çekme dayanımı	11
2.1.3.3 Eğilme özellikleri	12
2.1.4 Geopolimer harcın dayanımlılığı.....	13
2.1.4.1 Sülfat direnci	13
2.1.4.2 Asit direnci	14
2.1.4.3 Su emilimi	14
2.1.5 Geopolimer harcın mikroyapısı.....	15
2.2 Yüksek Fırın Cürufu	17
2.2.1 YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	18
2.2.1.1 Fiziksel özellikler	19
2.2.1.2 Kimyasal bileşim	19
2.2.1.3 Mineral bileşimi ve mikroskobik karakterizasyon	20
2.2.1.4 Hidrasyon mekanizması	20
2.2.2 Hidrasyon aktivasyon yöntemi.....	21

2.2.2.1 Fiziksel aktivasyon	21
2.2.2.2 Kimyasal aktivasyon	22
2.2.2.3 Yüksek fırın cürufunun çimento ve beton endüstrisi.....	22
2.2.4 YFC arasında sinerjik kullanım ve mekanizma analizi ve katı atıklar.....	23
2.2.4.1 Kompozit yüksek fırın cürufunun hazırlanması ve katı atıklar ve YFC arasındaki sinerjik mekanizma	23
2.2.4.2 Kırmızı çamur ve YFC'nin sinerjik kullanımı	24
2.2.4.3 Çelik cürufu ve YFC'nin sinerjik kullanımı.....	25
2.2.4.4 Endüstriyel yan ürün alçıların sinerjik kullanımı ve YFC.....	27
2.2.4.5 Uçucu kül ve YFC'nin sinerjik kullanımı	28
2.2.4.6 Çoklu katı atıklar ve YFC arasındaki sinerjik etki	30
2.2.5 Kompozit yüksek fırın cürufunun pazar analizi.....	31
2.3. Perlit.....	31
2.3.1 Genişleme süreci	33
2.3.2 Perlitin fiziksel özellikleri	35
2.3.3 Kimyasal bileşim.....	37
2.3.4 Uygulamalar	40
2.3.4.1 İnşaat uygulamaları.....	40
2.3.4.1.1 Alçı perlit esaslı sıva.....	40
2.3.4.1.2 Beton	40
2.3.4.1.3 Gevşek dolgu izolasyonu	41
2.3.4.1.4 Tavan döşemeleri	42
2.3.4.1.5 Zemin altı izolasyonu.....	43
2.4 Geopolimerde sülfat etkisi	43
2.4.1 Farklı sülfat çözeltilerinde daha önce yapılan çalışmalar	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM	47
3.1 Materyal	47
3.1.1 Yüksek fırın cürufu	47
3.1.2 Kum.....	48
3.1.3 Genleştirilmiş Perlit	48
3.1.4 Aktivatör.....	49
3.1.5 Sülfatlar	49
3.1.6 Aletler.....	50
3.1.6.1 Çelik kalıplar	50

3.1.6.2 Beton karışım mikseri.....	51
3.1.6.3 Hassas terazi	51
3.1.6.4.Etöv.....	52
3.1.6.5 Basınç dayanım cihazı	52
3.1.6.6 Eğilme dayanım cihazı	53
3.1.6.7 pH metre	53
3.2 Yöntem.....	54
3.2.1 Geopolimer harç karışım seçeneklerinin belirlenmesi	54
3.2.2 Geopolimer harç üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi	55
3.2.3 Sertleşmiş harç deneylerinde uygulanan yöntemler	55
3.2.4.1 Basınç dayanımı	56
3.2.4.2.Eğilme dayanımı.....	56
3.2.4.3 Kılcal geçirimsizlik deneyi	57
3.2.4.4. Ağırlık değişimi.....	58
3.2.4.5 Sülfat etkisi.....	58
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	59
4.1 Sertleşmiş Harç Deneyleri İle İlgili Bulgular Ve Tartışma	59
4.1.1 Kontrol numuneleri basınç dayanımları	59
4.1.2 Geopolimer harç kontrol numunelerinin eğilme dayanımı	61
4.1.3 Geopolimer harç kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı.....	62
4.1.4 Kontrol numunelerin görsel incelemeleri.....	64
4.2 Sülfat Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Harç Numuneleri İle İlgili Bulgular Ve Tartışma	65
4.2.1 Sülfat Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanımları	66
4.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları.....	71
4.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizliği.....	74
4.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	80
4.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim.....	83
4.2.6. Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Geopolimer üretiminde kullanılan temel malzemeler	3
Çizelge 2.2 : Ülkelerin YFC kimyasal içeriklerinin portland çimentosuyla karşılaştırılması (National Slag Association Publication)	20
Çizelge 2.3 : Genleştirilmiş perlitin tipik fiziksel özellikleri (Topçu ve Işıkdag, 2007; Singh ve Garg, 1991).....	36
Çizelge 2.4 : Perlitin kimyasal bileşimi (Yüzde) (Doğan ve Alkan, 2003)	38
Çizelge 2.5 : Nişastanın bağlayıcı olarak kullanıldığı perlitik ses yalıtım levhalarına örnekler (Denning, 1962)	43
Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi	47
Çizelge 3.2 : Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	48
Çizelge 3.3 : Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri	49
Çizelge 3.4 : Geopolimer harç kodları	54
Çizelge 3.5 : Karışımında kullanılan malzeme miktarları.....	54
Çizelge 4.1 : Kontrol numuneleri basınç ve eğilme dayanımı	59
Çizelge 4.2 : Geopolimer harç kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri	64
Çizelge 4.3 : Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri,MPa	67
Çizelge 4.4 : Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin eğilme dayanım değerleri	72
Çizelge 4.5 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri	75
Çizelge 4.6 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri	76
Çizelge 4.7 : Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	81
Çizelge 4.8 : %3 Na ₂ SO ₄ ve %3 MgSO ₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (Engin, 2015).....	19
Şekil 2.2 : YFC'nin XRD deseni (a) ve SEM fotoğrafı (b)	20
Şekil 2.3 : Çimento ile harmanlanmış yüksek fırın cürufu için hidratasyon prosesinin şeması	23
Şekil 2.4 : Demir-çelik üretim süreci (Dündar,2006)	26
Şekil 2.5 : Her hidratasyon çağında ÇC-YFC-Ç mukavemetini etkileyen faktörler.....	27
Şekil 2.6 : (a) UK, (b) PKUK, (c) YUK ve (d) YKUK'nin mikro yapısı (Cheah, vd., 2022, Giergiczny,2019)	29
Şekil 2.7 : Düşük gözenekliliğe (solda) ve retiküle C-S-H jeline (sağda) sahip sıkıştırılmış yapıların SEM görüntüsü (Zhang, vd., 2011).....	31
Şekil 2.8 : (a) Genleştirilmemiş perlit (b) Genleştirilmiş perlit	32
Şekil 2.9 : Yatay genişletici ve taşıma sistemi (Jackson, 1986).....	34
Şekil 2.10 : Dikey genişletici ve taşıma sistemi (Jackson, 1986)	35
Şekil 2.11 : Genleştirilmiş perlit taneciklerinde dahili olarak oluşan hücresel yapı.....	36
Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.....	47
Şekil 3.2 : Kum	48
Şekil 3.3 : Genleştirilmiş Perlit	49
Şekil 3.4 : Deneyleerde kullanılan sülfatlar	50
Şekil 3.5 : Çelik kalıplar	50
Şekil 3.6 : Beton harç mikseri	51
Şekil 3.7 : Hassas terazi	51
Şekil 3.8 : Etüv cihazı	52
Şekil 3.9 : Basınç dayanım cihazı	52
Şekil 3.10 : Eğilme dayanımı cihazı	53
Şekil 3.11 : pH metre	53
Şekil 3.12 : Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer harç numuneler	55
Şekil 3.13 : Kılcal geçirimsizlik düzeneğindeki numuneler	57
Şekil 3.14 : Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler	58
Şekil 4.1 : 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerleri.....	59
Şekil 4.2 : Geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımları	61
Şekil 4.3 : Geopolimer harç kontrol numunelerin zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri	64
Şekil 4.4 : Küp şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri	65

Şekil 4.5 : Prizma şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünüşleri.....	65
Şekil 4.6 : %3 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	67
Şekil 4.7 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri	68
Şekil 4.8 : %3 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	72
Şekil 4.9 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri	73
Şekil 4.10 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	76
Şekil 4.11 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	77
Şekil 4.12 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	77
Şekil 4.13 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	78
Şekil 4.14 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	78
Şekil 4.15 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	79
Şekil 4.16 : %3 MgSO ₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	81
Şekil 4.17 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	82
Şekil 4.18 : %3 Na ₂ SO ₄ ve %3 MgSO ₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi	84
Şekil 4.19 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp numunelerin görünüşleri	85
Şekil 4.20 : %3 MgSO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen prizma numunelerin görünüşleri ...	85
Şekil 4.21 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp numunelerin görünüşleri.....	86
Şekil 4.22 : %3 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen prizma numunelerin görünüşleri...	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
Ca₂SiO₄	: Kalsiyum Silikat
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO₂	: Karbondioksit
ÇC	: Çelik Cürufu
ÇDKN	: Çok Duyarlı Karbon Nanotüp
DAYY	: Dolaşımli Akışkan Yataklı Yanma
DK	: Dip Külü
Fe₂O₃	: Demir Oksit
FESEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GPA	: Genleştirilmiş Perlit Agregası
H₂O	: Su
K₂O	: Potasyum Oksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
Mg(OH)₂	: Magnezyum Hidroksit
MgCl₂	: Magnezyum Klorür
MgO	: Magnezyum Oksit
MK	: Metakaolin
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
NO_x	: Azot Oksit
PKL	: Pirinç Kabuğu Külü
PYKK	: Palmiye Yağı Yakıt Külü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	: Silisyum Dioksit
SO₂	: Kükürt Dioksit
TiO₂	: Titanyum Dioksit
UK	: Uçucu Kül
VK	: Volkanik Kül
XRD	: X Işını Kırınımı Yöntemi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
YKUK	: Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN

SÜLFAT DAYANIKLILIĞINA

GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGASININ ETKİSİ

Ömer Safa GÜR

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

110+xi sayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu çalışmada, geopolimer harçların sülfat etkilerine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışmada, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve agrega olarak kum ile birlikte farklı oranlarda genleştirilmiş perlit agregası (GPA) kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Altı farklı grup oluşturulmuş ve kum yerine hacimce %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında GPA kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harç numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra %3 konsantrasyonunda magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine 12 hafta süreyle maruz bırakılmıştır. Bu süre boyunca numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik, ağırlık ve pH değerleri değişimleri izlenmiş ve görsel değişimleri incelenmiştir. Deney sonuçları, 28 gün laboratuvar ortamında kür edilen kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanımları açısından en yüksek değerler, GPA oranı %0 olan C0 grubundaki numunelerde elde edilmiştir. GPA oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Sülfat çözeltilerinde beklenen numunelerin basınç ve eğilme dayanım değerleri azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayıları ise artmıştır. Görsel olarak incelendiğinde, sülfat çözeltilerinde beklenen numunelerde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit agregası, sülfat direnci

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE EFFECT OF EXPANDED PERLITE AGGREGATE ON SULFATE RESISTANCE OF HIGH-ALUMINA SLAG-BASED GEOPOLYMER MORTARS

Ömer Safa GÜR

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

110 + xi pages

2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this study, the durability of geopolymer mortars against sulfate effects was investigated. Geopolymer mortars were produced using blast furnace slag (BFS) as a binder and expanded perlite aggregate (EPA) in different proportions, along with sand as aggregate. Six different groups were created, and EPA was used in volumetric proportions of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% instead of sand. The produced geopolymer mortar specimens were subjected to 12 weeks of exposure to 3% concentration magnesium sulfate and sodium sulfate solutions after completing a 28-day curing period. During this period, changes in compressive strength, flexural strength, capillary permeability, weight, and pH values of the specimens were monitored, and visual changes were examined. The experimental results were evaluated by comparing them with the results of control specimens cured for 28 days under laboratory conditions. According to the obtained results, the highest compressive and flexural strength values of geopolymer mortars were obtained in specimens of group C0 with a EPA proportion of 0%. As the EPA proportion increased, compressive and flexural strength values decreased. The compressive and flexural strength values of specimens exposed to sulfate solutions decreased, while the capillary permeability coefficients increased. Visually, no deterioration was observed in specimens exposed to sulfate solutions.

Keywords: Geopolymer mortar, high-alumina slag, expanded perlite aggregate, sulfate resistance

1.GİRİŞ

Çimento, çimento esaslı yapı malzemeleri içerisinde en yaygın kullanılan geleneksel insan yapımı bir ham maddedir (Sumesh vd., 2017). Her yıl neredeyse her insan için bir ton çimento üretilir. Özellikle Çin'de, çimento endüstrisinin gelişmesiyle birlikte 1985'ten bu yana dünya çapında 30 yılı aşkın süredir çimento üretimi ilk sıraya yerleşmiştir.

Geleneksel Portland çimentosu, kireç taşı ve kil gibi ham maddelerin "iki öğütme ve bir kalsinasyon" teknolojisi ile işlenmesiyle üretilir ve bu süreçte kalsinasyon sıcaklığı 1450 °C'ye ulaşır.

Yirmi yıl önce, dünya çimento üretiminin ortalama karbon yoğunluğu çok yüksekti ve istatistiksel olarak, her ton çimento üretiminde 810 kg karbon dioksit (CO₂) üretilmiştir (Bhutta vd., 2017). Son yirmi yıl boyunca, her ton çimento üretimi için CO₂ emisyonu 750 kg'dan 640 kg'a kadar azalmış olsa da çimento üretimi büyük ölçüde artmış ve miktar hala artmaya devam etmektedir (World Business Council for Sustainable Development 2012). Sonuç olarak, geleneksel çimento üretimi yüksek enerji tüketen, kaynakları yoğun kullanan ve çevresel etkileri yüksek bir endüstridir. Ayrıca, çimento endüstrisi büyük miktarda sera gazı emisyonu kaynağıdır.

Dünya genelinde çimento üretimi nedeniyle her yıl yaklaşık 4 milyar ton ve %7 CO₂ emisyonu olduğu bildirilmiştir (Hardjito vd., 2017). Bu nedenle; çevresel kirliliğe karşı yeni uygun bağlayıcı malzemeler geliştirmek, CO₂, diğer kirletici gazların ve atık tozların emisyonunu en aza indirerek inşaat endüstrisinde geleneksel çimentonun yerini almak acil bir ihtiyaç olmuştur. (Abdel vd., 2016). Bazı araştırmacılar, geleneksel çimentoyu tamamen veya kısmen değiştiren bazı yeni malzemeler üretmişlerdir ve geopolimer malzemelerin potansiyeli yüksek bağlayıcı malzemeler olduğunu belirtmişlerdir (Lee vd., 2017).

Bu çalışmanın amacı, geopolimer harçların sülfat etkisine karşı dayanıklılığını belirlemek için GPA (Genleştirilmiş Perlit Agregası) ve YFC (Yüksek Fırın Cürufu) kullanarak geopolimer harç üretmektir. Bağlayıcı olarak YFC, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, agrega olarak kum ve GPA kullanılmıştır. Geopolimer harç karışımlarında belirli parametreler belirlenmiştir, silis modülü 1,5, NaOH çözeltisinin molaritesi 12 M ve su/bağlayıcı (s/b) oranı 0,8 olarak ayarlanmıştır. Üretilen numuneler, 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutlarında çelik kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat süreyle bekletilmiştir. Ardından, numuneler kalıplardan çıkarılarak 27 gün boyunca laboratuvar ortamında kür edilmiştir. Kür süresi tamamlanan numuneler, %3 konsantrasyonlu magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde 12 hafta süreyle bekletilmiştir. Bu süreçte, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda numunelerin ağırlık değişimleri belirlenmiş ve görsel değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, 28 gün laboratuvar ortamında kür edilen kontrol numuneleriyle karşılaştırma yapmak için numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve kılcal geçirgenlik katsayıları da 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, sülfat etkisine maruz kalan geopolimer harçların performansını değerlendirmek için kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Geopolimer

1979 yılında Davidovits tarafından tanıtılan yeni bir alüminosilikat malzeme olan "Geopolimer", zengin alüminyum ve silikon içeren baz malzemelerin alkali çözelti kullanılarak aktive edilmesiyle bağlayıcı olarak hizmet eder (Jumrat vd., 2011; Adam vd., 2014).

Geopolimer, kimyasal yapısı bakımından seramik ve zeolit benzeri olsa da amorf bir yapıya sahiptir. Oda sıcaklığında hızla sertleşebilir ve yüksek mekanik dayanım ile mükemmel dayanıklılık kazanabilir. Başka bir deyişle, geopolimerler alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu sonucu oluşur ve UK, GYFC gibi baz malzemeleri içerir. Geopolimerlerin özellikleri, baz malzemelerin özelliklerine (kimyasal bileşimi, cam fazı içeriği, çözünür silikon ve alüminyum miktarı, parçacık boyutu dağılımı ve inert parçacıkların varlığı) büyük ölçüde bağlıdır. Geopolimer üretimi için kullanılacak birçok baz malzeme türü vardır ve bunlar Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Baz malzemelerin cam fazı içeriği, parçacık morfolojisi, ince tanelik, mineralojik yapısı ve kimyasal bileşimi, alüminosilikat kaynakların aktivitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mükemmel baz malzemelerin yeterli miktarda küresel cam boncuk içermesi, aşırı amorf yapıya sahip olmaması, alüminyumun kolayca salınımını sağlayacak üstün bir yeteneğe sahip olması ve düşük su talebi olması gerektiğini belirtmişlerdir. (Sumesh vd., 2017). Geopolimerler, sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali çözeltiler kullanılarak hazırlanır (Teewara vd., 2014).

Sertleşme süreci genellikle çevresel sıcaklıktan daha yüksek bir sıcaklıkta, 60-100°C arasında 24-28 saat boyunca gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıkta sertleştirildikten sonra, geopolimer oda sıcaklığında bırakılabilir. Geopolimerin sertleşme süresi kısadır, bu nedenle erken yüksek dayanıma sahiptir. Geleneksel çimentonun sertleşme süresi 10-12 saat arasında değişirken, geopolimerin sertleşme süresi genellikle 2-4 saat arasındadır. 4 saatlik sertleşme süresiyle, geopolimerin dayanımı nihai dayanımının %70'ine ulaşabilir. Bu açıdan; geopolimerin dayanım özellikleri hızlı sertleşen çimentoya benzer, ancak fiziksel özelliklerinin hızlı sertleşen çimentodan daha iyi olduğu bildirilmiştir (Van Jaarsveld vd., 1999).

Geopolimerin iskelet yapısı oksit sistemine aittir, bu nedenle 1000-1200°C yüksek sıcaklıklarda oksitlenip bozulmaz. Aynı zamanda, yüksek yoğunluğu hava girişini engellediğinden iç kısmı oksitlenemez ve mükemmel bir ısı yalıtımı etkisine sahiptir. Geopolimerler asit direnci açısından da mükemmeldir, çünkü oda sıcaklığında Si-O ve Al-O bağlarının ağ yapısında asit ile reaksiyona girmesi zordur ve geopolimer, çeşitli asit çözeltilerinde ve organik çözücülerde mükemmel bir stabilite sergilemiştir (Zhang vd., 2003).

Çizelge 2.1: Geopolimer üretiminde kullanılan temel malzemeler

Sınıflandırma	Temel Malzemeler	Kısaltma
Uçucu kül	Uçucu kül	UK
	Dip külü	DK
	Sirkülasyonlu akışkan yatak yanma uçucu külü	SAYUK
	Palmiye yağı yakıt külü	PYYK
	Volkanik kül	VK
	Yüksek kalsiyumlu uçucu kül	YKUK
	Atık kâğıt çamuru külü	AKÇK
	Pirinç kabuğu külü	PKL
Cüruf	Yüksek fırın cürufu	YFC
	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu	ÖGYFC
	Hava soğutmalı cüruf	HSC
	Çelik cürufu	ÇC
	Ferrokrom cürufu	FC
Diğer atıklar	Metakaolin	MK
	Kaolin	—
	Kil	—
	Zemin perliti	ZP
	Silika atığı	SA

Geopolimerin %5 sülfürik asit çözeltisindeki çözünme hızının Portland çimentosunun sadece on üçte biri, %5 hidroklorik asit çözeltisindeki çözünme hızının ise Portland çimentosunun sadece on ikide biri olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2005).

Geopolimerin büzülme katsayısı çimentoya kıyasla çok daha düşüktür ve geopolimerin 7 ve 28 gün boyunca kür edilmesi sonucu büzülme katsayıları sırasıyla Portland çimentosunun sadece 1/5-1/7 ve 1/8-1/9' udur. Geopolimer, agrega ara yüzüyle Portland çimentosuna kıyasla daha iyi bir bağlanma davranışına sahiptir. Geopolimer, kompozit içindeki alkali-agrega reaksiyonunu zayıflatabilen büyük miktarda alkali metal iyonu absorbe edebilir. En önemlisi, geopolimerin ham madde kaynakları bol miktarda bulunur ve geopolimer üretimi düşük enerji tüketimi ve düşük kirlilikle karakterize edilir. Bu nedenle, geopolimer yapı malzemelerinde Portland çimentosunun yerini alacak önemli bir bağlayıcı malzeme olarak uygulama potansiyeline sahiptir.

Geleneksel çimento harcı genellikle tüm mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılan ortak bir bağlayıcı ve tamir malzemesi olarak hizmet verir. Birçok araştırmacı, geopolimer harcın geleneksel çimento harcının yerine uygun bir alternatif olarak kullanılma ve uygulanma potansiyeli hakkında tartışmıştır (Atis vd., 2009; Sathonsaowaphak vd., 2009; Yodsudjai vd., 2010; Aguiar vd., 2015; Wazien vd., 2016; Satya vd., 2016).

İlk geopolimer harç çalışması, Sathonsaowaphak tarafından (Sathonsaowaphak vd., 2009) yapılmıştır. Bu çalışmada, taban kül inceliği, kül/alkalin sıvı oranı, sodyum hidroksit (NaOH)/sodyum silikat (Na₂SiO₃) oranı, NaOH konsantrasyonu, su/kül oranı ve süperplastikleştirici etkileri araştırılmıştır. Geopolimer harcın işlenme performansı ve

basınç dayanımı, atık malzemelerin kullanıldığı ve harç karışımı için Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltilerinin kullanıldığı şekilde hazırlanmıştır. Sonuçlara bakıldığında, mekanik dayanımın 24-58 MPa' ya ulaştığı ve NaOH çözeltisinin geopolimer harcının işleme performansını hafifçe artırabileceğini, ancak dayanımı azaltmadığı göstermiştir.

Detphan ve Chindaprasirt (2009), Tayland'da yüksek dayanımlı geopolimer harçları ilk kez UK ve PKL kullanarak hazırlamışlardır. Bu harçlar, Na_2SiO_3 , NaOH ve ısı kullanılarak etkinleştirilmiştir. Farklı PKL dozajları kullanılarak, geopolimer harçların yoğunluğu ve dayanıklılığı test edilmiş ve PKL'nin ince öğütülmesi, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve PKL/UK oranının geopolimer harçların dayanıklılığını belirlediği sonucuna varılmıştır.

2.1.1 Taze geopolimer harcın özellikleri

2.1.1.1 İşlenebilirlik

Taze geopolimer harcın işlenebilirliği, sertleşmiş geopolimer harcın özelliklerini belirleyen önemli bir faktördür. Su genellikle taze harçların akıcılığını kontrol etmek için kullanılır ve belirgin bir mukavemet azalması olmadan akıcılığı kontrol eder (Chindaprasirt 2007). Harcın işlenebilirliği, genellikle akışla değerlendirilir ve ASTM C 1437 standardına göre akış testi ile ölçülür. Test cihazları arasında akış kalıbı, mala, dövme kalıbı, akış tablosu ve ölçüm bandı bulunur. Akış testi aracılığıyla, harcın işlenebilirliği, doldurma kabiliyeti ve tutarlılığı gibi taze özellikleri elde edilebilir.

Li vd., (2009) polimer tozu eklemenin, geopolimer harcın akışkanlığını azalttığını ve polimer tozu miktarının artmasıyla bir azalma eğilimi olduğunu belirtmiştir. Jumrat vd., (2011) yüksek viskoziteli Na_2SiO_3 çözeltisi nedeniyle uçucu kül/alkali çözelti oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının artmasıyla geopolimer harcının akış değerinin azaldığını ve işlenebilir bir geopolimer harcı elde etmek için daha fazla su eklenmesi gerektiğini göstermiştir. Na_2SiO_3 bileşeninin artması, bağlayıcının hızlı oluşumuna ve daha yüksek viskozitesine neden olmuş ve taze harcın sıcaklığı NaOH ve Na_2SiO_3 seviyesinin artmasıyla artmıştır. (Kotwal vd., 2015).

Bhowmick ve Ghosh'un (2012) çalışması, kül/kum oranının artışının geopolimer harcın akma değerinin yüzdesini artırdığını göstermiştir ve taze geopolimer harcın akış kabiliyeti ve yapışkanlığı, aktivatördeki $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının artmasıyla artmıştır. Ayrıca, agreganın gradasyonu ve parçacık boyutunun harcın akış kabiliyeti ve tutarlılığı üzerinde etkili olduğu da bulunmuştur. Li vd., (2013), harç işlenebilirliğinin değerlendirme indeksi olarak 30 saniye ve 30 dakikalık akışkanlığı benimsemişlerdir ve NaOH konsantrasyonu azaldıkça geopolimer harcının akışkanlığının arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı sonuç, farklı çözelti/kül oranlarına sahip geopolimer harçlar için Patankar vd., (2014) tarafından da doğrulanmıştır.

Malkawi vd., (2016), YKUK içeren geopolimer harcın akışkanlığının NaOH konsantrasyonundan etkilendiğini ve işlenebilirliğin NaOH konsantrasyonunun artmasıyla azaldığını akış testi yoluyla göstermişlerdir. Huseien vd., (2016), kalsiyum/silikat oranı ve alkali aktivatör çözelti tipinin geopolimer harcın akışına etkisini incelemişler ve sodyum

silikatın alkali çözelti olarak kullanılmasının, Na_2SiO_3 'ün yüksek viskozitesi nedeniyle NaOH içermeyen geopolimer harcın akışını azaltabileceğini göstermiştir.

Sathonsaowaphak vd., (2019), linyit taban külü kullanılarak üretilen geopolimer harçların işlenebilirliğini incelemiştir. Taban kül inceğinin, sıvı alkali/kül oranının, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının, NaOH konsantrasyonunun ve su/kül oranının işlenebilirlik üzerinde büyük etkisi vardır. Yan ve Sagoe-Crentsil (2012) testler yoluyla, kuru atık kâğıt çamurunun harç karışımına katılmasıyla geopolimer harcın akış davranışının önemli ölçüde değiştiğini gözlemlemişlerdir; çünkü harç karışımındaki bol miktardaki su, atık kâğıt çamurunca emilmiş ve bu da harç akış özelliklerinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Dolaşımli akışkan yataklı yanma taban külü, ince agreganın yerine kullanılabilir, ancak standart kum kullanımına kıyasla daha düşük akış değerlerine sahip olacağını bildirmişlerdir (Li vd., 2013).

Kabir vd., (2015), bağlayıcı olarak, MK seçerek PYKK ve YFC kullanarak geopolimer harç hazırlamışlardır. Sonuçlarına göre, PYKK'ya MK ilavesi, PYKK'nın süngerimsi ve gözenekli mikroyapısı ve MK partiküllerinin daha ince boyutu nedeniyle akış eğilimini azaltmıştır. YFC içeriği arttıkça, geopolimer harçların akış kabiliyeti de azalmıştır (Al-Majidi, 2016). YFC içeriği arttıkça, yuvarlak partikül sayısı azalırken, UK'de olmayan yuvarlak parçacıkların miktarı artmıştır.

Lee vd., (2016), cüruf ve UK esaslı geopolimer harçları stiren-bütadien (SB) lateks uygulayarak üretim gerçekleştirmiş ve akış test sonuçları, SB lateks dozu ve iri taban külün akış değeri üzerinde neredeyse hiç etkisinin olmadığını göstermiştir. Ancak alkali aktivatörlerin eklenmesi akış değerini artırmıştır. Deb vd., (2016), silika nano-parçacıklarının taze geopolimer harçlarının akış özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve üç seri karışımda silika nano-parçacıklarının kullanımının akış değerini azalttığını bildirmiştir. Bu durum, nano-parçacıkların reaksiyonunu hızlandırması ve su ihtiyacını artırmasıyla açıklanmıştır. Laskar ve Talukdar (2017) çalışmalarından elde ettikleri sonuçlara göre, alkali aktivatör türünün geopolimer harcın işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıktır. NaOH'un alkali aktivatör olarak kullanıldığı karışımların, NaOH ve Na_2SiO_3 'ün birlikte kullanıldığı karışımlara göre daha iyi bir işlenebilirliğe sahip olduğu belirtilmiştir.

2.1.1.2 Zaman ayarı

Taze harcın sertleşme süresi, harcın taşınma, dökme ve sıkıştırma süresini belirleyen önemli bir faktördür. Sertleşme süreleri, ASTM C 807 ve BS EN 480-2 standartlarına göre Vicat iğnesi cihazı kullanılarak test edilebilir. İlk sertleşme süresi, harç karışımının hazırlanmasından sonra iğnenin taban plakasının 4 mm derinliğe gömülmesine kadar geçen süre olarak ölçülebilir. Son sertleşme süresi ise iğnenin 2,5 mm derinliğe inmesiyle test edilir (BS EN 480-2).

UK esaslı üretilen geopolimer harçlarda, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve alkali çözelti/UK oranının sertleşme süreleri üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığı saptanmıştır. (Jumrat vd., 2011). NaOH molaritesindeki artış, geopolimer harçların ilk ve son sertleşme

sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır (Saloma, 2016). NaOH molaritesinin artmasıyla geopolimer harçların sertleşme süresinde azalma eğilimi vardır. Phoo-ngernkham vd., (2016), yüksek NaOH konsantrasyonlarının sertleşme süresini geciktirebileceğini belirtmiştir.

Malkawi vd., (2016), NaOH molaritesinin değişmesiyle Na/Si oranının değişebileceğini belirterek, sertleşme süresini etkileyen ana faktörün Na içeriği olduğunu bildirmişlerdir. Kalsiyum içeriği, geopolimer harçların sertleşme süresi üzerinde dikkate değer bir etkiye sahiptir. Daha yüksek kalsiyum içeriği, daha kısa ilk ve son sertleşme sürelerine neden olabileceğini belirtmişlerdir (Ismail vd.,2016). Laskar ve Talukdar, (2017), sadece sodyum hidroksit kullanarak üretilen taze geopolimer harcın, sodyum hidroksit ile birlikte Na₂SiO₃ kullanarak üretilen taze geopolimer harçtan daha uzun sertleşme süresi elde ettiğini bildirmiştir.

Al-Majidi vd., (2016), YFC miktarının geopolimer harçların sertleşme sürelerini büyük ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir. Karışıma YFC dahil edilmesi, geopolimer harçların sertleşme sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır. YFC içeriği arttıkça, sertleşme süresi önemli ölçüde azaltmıştır. SiO₂ nano partiküllerinin kullanımı, 12 M konsantrasyonlu geopolimer harçların sertleşme sürelerini azaltırken, nano-SiO₂ dozunun artmasıyla donma süresi yavaş yavaş artmıştır.

Geleneksel Portland çimentosu, diğer teşvik edici malzemelerle birlikte veya ayrı ayrı kullanılarak geopolimer harçları üretmek için kullanılabilir. Genel olarak, Portland çimentosu harcının sertleşme süresi, geopolimer harcından daha uzundur. Portland çimento miktarı arttıkça, sertleşme süresi giderek azalmıştır (Phoo-ngernkham vd., 2015).

Phoo-ngernkham vd., ile Hanjitsuwan vd., (2017), alkali aktif malzemeler ve kalsiyum karbür artığı çimento kombinasyonunu kullanan geopolimer harçların sertleşme sürelerini incelemişlerdir. Sonuçları, kalsiyum karbür artığı tarafından değiştirilen taban külü dozajının artmasıyla geopolimer harçların sertleşme sürelerinin açıkça azaldığını ve kalsiyum karbür artığı içeren geopolimer harcın, Portland çimento içeren harcın sertleşme süresinden daha yavaş donduğunu göstermiştir.

2.1.1.3 Taze geopolimer harcın sıcaklığı

Geopolimer harcı karıştırılırken, taze geopolimer harcın sıcaklığı geleneksel çimento harcından daha yüksek olduğunu, çünkü daha karmaşık kimyasal reaksiyonlar nedeniyle geopolimerleşmenin endotermik olduğunu belirtmişlerdir (Davidovits vd., 1991).

Jumrat vd., (2011), taze geopolimer harcın yüzey sıcaklığını hemen karıştırdıktan sonra kızılötesi termometre kullanarak ölçmüşlerdir ve sıcaklık daha sonra 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 ve 24 saat sonra tekrar ölçülmüştür. Harç numunesinin sıcaklığı ölçüldüğü mesafeden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sonuçlar, geopolimer harcın karıştırılmasından hemen sonra en yüksek sıcaklığa sahip olduğunu ve sıcaklığın zamanla azaldığını göstermiştir. Bu düşüş özellikle 3 saat sonra belirgin hale gelmiştir. Kotwal vd., (2015), ASTM C 1064 uyarınca dijital termometre kullanarak taze geopolimer harcın sıcaklığını ölçmüşlerdir ve taze geopolimer

harcın sıcaklığının 32 ila 54°C arasında değiştiğini bulmuşlardır. Ayrıca, Na₂SiO₃ ve NaOH dozajları arttıkça harcın sıcaklığı da artmıştır. Ancak ince agreganın içeriği arttıkça sıcaklıkta azalma eğilimi gözlenmiştir.

2.1.2 Geopolimer harçların fiziksel özellikleri

Geopolimer harçların fiziksel performansı, farklı malzeme bileşimleri nedeniyle geleneksel harçlardan oldukça farklıdır. Steinerova, (2011) tarafından elde edilen sonuçlar, geopolimer harcın kum içeriğinin porozite, hacim yoğunluğu ve gözenek boyutu dağılımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Gorhan vd., (2014), farklı NaOH konsantrasyonlarına sahip geopolimer harçların fiziksel özellikleri üzerinde sıcaklıkta sertleşme süresinin etkisini ortaya koymuştur. 85°C sıcaklıkta sertleştirilen geopolimer harcın hacim yoğunluğunun sertleşme süresi uzadıkça yükseldiği, görünür porozitenin ve su emiliminin ise sertleşme yaşı arttıkça azaldığı sonucuna varılmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonunun artması, geopolimer harçların alkaliliği üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını ve geopolimer harçların en yüksek pH değeri, yaygın çimento harçlarının pH değerinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir (Patankar vd., 2014). Bu, çok miktarda alkali çözeltisi kullanılsa bile alkali-agrega reaksiyonunun neredeyse hiç oluşmayacağı anlamına gelmiştir.

Al-Majidi vd., (2016) tarafından yapılan bir araştırmada, YFC içeriğinin geopolimer harcın görünür gözenekliliği üzerindeki etkisi incelenmiş ve YFC içeriğinin artmasıyla geopolimer harcın görünür gözenekliliğinin önemli ölçüde azaldığı sonucuna varılmıştır. Yan ve Sagoe-Crentsil, (2012) atık kâğıt hamuru içeren geopolimer harçların hacim ağırlığı ve su emme özelliklerini ölçmüşler ve harcın kaynatıldıktan sonra daha yüksek su emme özelliği sergilediğini, suda bekletildikten sonra ise daha düşük su emme özelliği sergilediğini ve hacim ağırlığının kâğıt hamuru içeriği arttıkça azaldığını bulmuşlardır. Shadnia vd., (2015) tarafından elde edilen sonuçlar, farklı faz değiştirici malzeme dozajlarına sahip geopolimer harçların özgül ağırlığındaki belirgin bir değişim olduğunu göstermiştir ve faz değiştirici malzeme katkısı arttıkça birim ağırlığın azaldığı görülmüştür.

Geopolimer harçlardaki farklı malzemelerin kullanımının fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ranjbar vd., (2014), UK'nın kısmen PYYK ile değiştirildiği geopolimer harcın yoğunluğunu ölçerek, UK'nın PYYK ile değiştirilmesinin hacim ağırlığını önemli ölçüde azalttığını ve daha yüksek değiştirme oranlarının daha büyük bir azalmaya neden olduğunu bulmuşlardır. Na₂SiO₃/NaOH oranının taban küllü hazırlanan geopolimer harcın fiziksel özellikleri üzerinde de önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir (Haq vd., 2016). Abdollahnejad vd., (2015), farklı miktarda UK ve kalsine kaolin içeren geopolimer harçların su emme ve kapiler katsayılarını karşılaştırmışlardır. Tüm harçlar benzer su emilimi gösterirken, %8 kalsine madde içeren harçta yüksek kapiler su emilimi tespit edilmiştir.

Ayrıca, nano-SiO₂ gibi malzemelerin kullanımının da geopolimer harçların fiziksel özelliklerini etkilediği araştırılmıştır. Adak vd., (2014), farklı molar konsantrasyonlardaki geopolimer harçlara %6 nano-SiO₂ eklenmesinin, nano parçacıkların harç mikro yapısına modifikasyonundan dolayı su emilimini azaltabileceğini göstermiştir. Deb vd., (2016),

emcilik testleri sonuçlarına göre, nano-SiO₂'nin katılmasının, bazı ek reaksiyon ürünlerinin çökmesinden kaynaklanan geopolimer harçların emicilik katsayısını azalttığını tespit etmişlerdir. Khater vd., (2016), ÇDKN eklenmesinin, ÇDKN dozu %0,1'den az olduğunda geopolimer harçların su emilimini azaltacağı ve daha fazla ÇDKN eklemesi ile artacağı sonucuna varmışlardır.

2.1.3 Geopolimer harcın mekanik performansı

2.1.3.1 Basınç dayanımı

Farklı ham maddeler ve geopolimer harç oranları, geopolimer harçların dayanıklılığını etkiler. Ismail vd., (2013), MK ve PYYK kullanarak üretilen geopolimer harçların erken dayanım özelliklerini farklı NaOH ve Na₂SiO₃ ortamı değiştirme seviyeleri ile incelemiştir. Ranjbar vd., (2014), PYYK bileşimi, yüzey alanı ve parçacık şeklinin, geopolimer harçların basınç dayanımı üzerinde büyük etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, PYYK dozajının artmasıyla silika/alümina oranının artması nedeniyle geopolimerizasyon sürecinin geciktiği ve harçların erken basınç dayanımının azaldığı gösterilmiştir. Yusuf vd., (2014), silika açısından zengin PYYK 'nın MK ile karıştırılmasının, geopolimer harçların dayanım dağılımına etkisini araştırmıştır ve karışık geopolimer harçların Weibull dağılımının analiz edilmesine uygun olduğunu belirtmiştir. YFC, PYYK ve düşük kalsiyumlu UK bir arada kullanılabilir, ancak oranları uygun olması gerektiğini belirtmişlerdir. Islam vd., (2014), %70 YFC ve %30 PYYK 'dan oluşan bağlayıcı ile elde edilen maksimum basınç dayanımı yaklaşık 66 MPa olan geopolimer harç elde etmişlerdir.

Sathonsaowaphak vd., (2009), DK inceliği, Na₂SiO₃/NaOH oranı, sıvı alkali/kül oranı ve NaOH konsantrasyonunun geopolimer harçların basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Vasconcelos vd., (2011), MK bazlı geopolimer harçların basınç dayanımının 7 günden fazla sürdüğü sürece daha yüksek NaOH konsantrasyonu ile arttığını belirtmişlerdir. Ancak, YKUK bazlı geopolimerlerde çok daha yüksek NaOH konsantrasyonu dayanımı düşürebilir, bu nedenle uzun zincirli yağ asitleri bazlı geopolimer harçların durumu tam tersi olabilir (Malkawi vd., 2016). Mijarsh vd., (2015), harcın iyileşme süresi boyunca Na₂SiO₃ konsantrasyonunu azaltmanın, basınç dayanımına büyük katkı sağladığını ve yüksek Na₂SiO₃ konsantrasyonu ile üretilen geopolimer harçların kalıptan bir gün sonra uygulandığında en yüksek basınç dayanımı gelişimini gösterdiğini bildirmişlerdir. Bhowmick ve Ghosh, (2012), SiO₂/N₂O oranı ve H₂O/UK oranının geopolimer harcının basınç dayanımına etkisini ortaya koymuşlardır. SiO₂/N₂O molar oranının artması, Na₂SiO₃/NaOH oranına bağlı olarak farklı etkiler gösterir. Na₂SiO₃/NaOH oranı 1 veya 2 olduğunda, molar oran arttıkça basınç dayanımı azalırken, Na₂SiO₃/NaOH oranı 1.5 veya 2.5 olduğunda, basınç dayanımı artmıştır (Thaarrini vd., 2015).

UK/NaOH, Na₂SiO₃ ve kum oranları, geopolimer harçların basınç dayanımını farklı şekillerde etkilemiştir. Kum/UK oranının etkisi düzensizdir, ancak basınç dayanımı Na₂SiO₃/UK oranının artmasıyla artmıştır. NaOH/UK oranı 0.05'ten 0.125'e yükseldiğinde, harcın basınç dayanımı önce artar, sonra azalır. Bağlayıcı/kum oranı da

geopolimer harçların basınç dayanımını etkilemiştir. Harcın basınç dayanımı, bağlayıcı/kum oranı 0.25'ten 0.5'e yükseldikçe artar, ancak bağlayıcı/kum oranı 0.5'ten 4.0'a yükseldiğinde basınç dayanımında azalma eğilimi olduğunu bildirmişlerdir. (Wazien vd., 2016). Temuujin vd., (2010) tarafından yapılan çalışma sonuçları, geopolimer bağlayıcının agrega ile olan bağlantısı ve geopolimerlerin dayanımı, harcın basınç dayanımını belirlediğini göstermiştir.

Geopolimer harçların basınç dayanımı, poröz yapılarıyla ilişkilidir ve bu yapı, kullanılan kumun türü ve oranı ile ilişkilidir. Kalkerli kumun katılmasıyla elde edilen geopolimer harçların dayanıklılığı üzerine etkisi tartışmaya değerdir. Arellano-Aguilar vd., (2014), kalkerli kumun katılmasının harçların dayanımını azaltacağını, ancak kalkerli kumun 7:1 oranındaki kum/binder oranı ile kullanımıyla yeşil inşaat malzemelerinin elde edilebileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte, Zejak vd., (2013), kalkerli kumun eklenmesinin UK bazlı geopolimer harçların basınç dayanımını artırdığını ve iyi bağlanmış taneleri olan kumun, geopolimer yapının jel fazını değiştirdiği sonucuna varmıştır. Bashar vd., (2014;2016) sonuçları, %100 imalat kumu ve taş ocağı tozu kullanılarak hazırlanan geopolimer harcın, %100 geleneksel maden kumu kullanılarak hazırlanan harca göre belirgin bir dayanım azalması olmadığını göstermiştir. Steinerova, (2011), düşük kum dozajları için kum oranının artmasıyla geopolimer harcın basınç dayanımının arttığını, ancak %78 kum oranından sonra basınç dayanımının azaldığını belirtmişlerdir.

Geopolimer harçların basınç dayanımı, sertleşme yöntemi tarafından büyük ölçüde etkilenmiştir. Erken aşamada, fırın sertleştirilmesi ve 60°C'de 24 saat buhar sertleştirilmesi ile sertleştirilen UK bazlı geopolimer harçların basınç dayanımları, geleneksel standart sertleştirme koşullarında sertleştirilen harca göre daha yüksektir. Ancak, geleneksel standart sertleştirme yöntemi, dayanım gelişimi açısından avantaj sağlamıştır (Li vd., 2013). Patankar vd., (2014), 3 gün boyunca sertleştirilen geopolimer harçların basınç dayanımının fırın sertleştirilmesi derecesi arttıkça hızlandığını göstermiştir, ancak fırın sertleştirilmesi 3 günün üzerinde olduğunda dayanım artışı azalmıştır. Li vd., (2013), C sınıfı UK içeren geopolimer harçların 70°C'de 20 saat boyunca sertleştirilmesinin en yüksek basınç dayanımını elde ettiğini göstermiştir. Ancak, Adam ve Horiato, (2014), UK içeren geopolimer harçların en yüksek basınç dayanımını 120°C'de 20 saat boyunca sertleştirilmesiyle elde ettiklerini bulmuşlardır. Gorhan ve Kurklu, (2014), NaOH konsantrasyonu ve sertleştirme süresi arttıkça, sertleştirme sıcaklığı 85°C olduğunda geopolimer harçların basınç dayanımında artış eğilimi olduğunu bulmuşlardır ve mükemmel dayanım elde etmek için optimal NaOH konsantrasyonunun 6M, sertleştirme sıcaklığının ise 85°C olduğunu belirtmişlerdir. Helmy, (2016) araştırmasında, geopolimer harçların aralıklı sertleştirme yöntemi kullanılarak 70°C'de her biri 6 saat olan 4 adımda sertleştirilmiştir ve 18 saat ara verilmiştir. Bu yöntemin, geopolimer harçların basınç dayanımını artırabileceği sonucuna varılmıştır. Narayanan ve Shanmugasundaram, (2017) ise farklı sertleştirme yöntemlerini, sıcak hava fırını sertleştirilmesi, ısı odası, oda sıcaklığı ve otoklav gibi, karşılaştırmışlardır ve 80°C'de 6 saat sertleştirilen geopolimer harcın en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu bulmuşlardır. Mermerdas vd., (2017) ise hafif

yapılı geopolimer harçların sertleştirme aşaması sıcaklığının artmasıyla, harçların basınç dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

Mijarsh vd., (2015) ise PYYK tabanlı geopolimer harcın işlenmiş deney çalışması ile Ca(OH)_2 ile alkali-aktivatör kaynak malzemesinin değiştirilmesinin, hazırlanan harçların basınç dayanımını büyük ölçüde artırabileceğini gözlemlemişlerdir. Ancak, Shadnia vd., (2015) yaptıkları çalışmada, faz değiştirme malzemelerinin eklenmesinin, geopolimer harçların basınç dayanımını azalttığını göstermiştir. Çünkü faz değiştirme malzemelerinin düşük sertliği ve dayanımı vardır. Faz değiştirme malzemelerinin geopolimer harçlara eklenmesi, ısı taşınımını azaltabilir ve sonuç olarak, faz değiştirme malzemeleri içeren geopolimer harçların, soğutma ve ısıtma enerjisi talebini azaltmak için kırsal bölgelerde kullanılabilirliği belirtilmiştir. (Wang vd., 2016).

Nguyen vd., (2017) ise sönmemiş kireç ve sıcak paket malzemesi olmak üzere iki tür termojenetik katkı kullanarak, hazırlanan geopolimer harçları karşılaştırmışlardır ve sönmemiş kireç içeren geopolimer harcın, sıcak paket malzemesi içeren harçtan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Cyr vd., (2012), alkali-aktive cam kırığı kullanarak geopolimer harçları üretmişlerdir. Sonuçlarına göre, ince cam tozunun harçların basınç dayanım gelişimini önemli ölçüde etkilediği ve en ince parçacıklı camın, harçlar için en yüksek basınç dayanımını sağladığı görülmüştür. Atık kâğıt çamuru ve silika atığı gibi birçok endüstriyel atık, geopolimer hazırlamak için kullanılabilir. Yan ve Sagoe-Crentsil, (2012), %2,5 ve %10 içerikli atık kâğıt çamuru içeren geopolimer harcın ortalama 91 günlük basınç dayanımının, kontrol harcının dayanımına kıyasla sırasıyla sadece %8 ve %48 azaldığını göstermişlerdir. Geopolimer harç karışımının tasarımında, basınç dayanımı ilk düşünülen parametredir. Chawakitchareon ve Veessommai (2013), atık malzemeden saf alümina ve silika atığını kullanarak geopolimer harçların basınç dayanımını artırmıştır. UK'nın YFC ile değiştirilmesiyle birlikte hazırlanan geopolimer harçlar, UK'nın YFC ile değiştirilme oranının artmasıyla daha yüksek basınç dayanımı gösterir (Rao vd., 2015). MK, PYYK ve YFC kombinasyonu ile hazırlanan geopolimer harç için, YFC değiştirme oranının %35'in üzerine ve MK değiştirme oranının %20'nin üzerine çıkması harcın basınç dayanımını azaltmıştır (Kabir vd., 2015). MK ile değiştirilen farklı oranlardaki taban kül kullanılarak, aynı sıvı/bağlayıcı oranına sahip eşit oranlı MK ve taban kül içeren geopolimer harcın en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur (Kumar vd., 2016). Kalsiyum karbür artığı ve Portland çimentosu kullanarak taban kül geopolimer harçları için, harç, taban külün %30'unun Portland çimentosu ve %30'unun kalsiyum karbür artığı ile değiştirildiği durumda en yüksek basınç dayanımını elde etmişlerdir (Hanjitsuwan vd., 2017).

Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, birçok tür nano partikül modifiye edilmiş geopolimer harcı hazırlamak için kullanılabilir hale gelmiştir. UK içeren nano gümüş-silika ve nano silika takviyeli geopolimer harçları, farklı kür sürelerinde çimento harçlarından daha iyi basınç dayanımı sergilemiştir (Adak vd., 2015). Adak vd., (2014), farklı oranlarda koloidal nano-silika ilavesi uygulayarak uçucu küllü geopolimer harçları hazırlamışlardır. Geopolimer harcın ortamda sürüldüğü durumda, %6 UK yerine nano

silika için optimum dozajın tatmin edici basınç dayanımı elde etmek için olduğunu bulmuşlardır. Ağırlıkça %0.1 ve %0.2 ÇDKN eklenmesi, alkali aktivasyonlu geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımını belirgin şekilde artırabilir, ancak takviye, 90 günlük kür edilme süresinden sonra belirgin olmadığını belirtmişlerdir (Khater vd., 2016). Nazari ve Sanjayan'ın, (2015) çalışmasında, beş çeşit metaeuristik algoritma uygulanarak, destek vektör makineleri parametreleri optimize edilmiştir ve geopolimer harçların basınç dayanımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Ng ve Foster, (2013), basınç dayanımını temel odak noktası olarak ele alarak, geopolimer harç karışımları için yeni bir karışım tasarım yöntemi geliştirmişlerdir.

2.1.3.2 Çekme dayanımı

Genellikle çimento, beton ve harçlarla birlikte, geopolimer harçların basınç yükü altında mükemmel bir performans sergilediği kabul edilir. Ancak, inşaat malzemelerinin çatlamaya karşı direnci, çekme performansı ile ilgilidir ve dikkate alınması gerekir. Guades, (2016) yaptığı deneylerle geopolimer harçların çekme özelliklerini değerlendirmiştir. Geopolimer harçların çekme dayanımı kum/UK oranının artmasıyla yavaş yavaş artarken, 7 günden 28 güne kadar zamanla artmıştır. Chuah vd., (2016), geopolimer harç numunelerinin ortalama çekme dayanımını ACI standardının tasarım dayanımı ile karşılaştırmışlardır ve kırılma dayanımı kum tipine bağlı olmaksızın ACI kodu tarafından belirtilen tasarım gereksinimlerini karşılayabileceğini belirtmişlerdir. Al-Majidi vd., (2016), YFC ve UK kullanarak geopolimer harçları üretmiştir. Doğrudan çekme dayanımı sonuçlarına göre, YFC katkısının harçların 7 günlük ve 28 günlük olgunlaşma aşamalarında çekme performansı üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Çekme dayanımının, cüruf dozajının artmasıyla artan bir eğilim gösterdiğini belirtmişlerdir. Zhang vd., (2016), geopolimer harçların, 25 ila 700°C arasındaki yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarından sonra çimento harçlarının ve polimerle modifiye edilmiş çimento harçlarının her zaman daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Polimerle modifiye edilmiş çimento harçlarının sadece 300°C sıcaklıkta geopolimer harçlarda daha iyi çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Adak vd., (2014) çalışmasına göre, sonuçlar %6 nano silika ilavesinin oda sıcaklığında olgunlaşan geopolimer harcın çekme dayanımını artırdığını ve aktivatör çözeltisinin mol konsantrasyonunun artmasıyla kopma dayanımının arttığını göstermiştir.

Alkali aktivatörün çözelti türleri ve kütleme sıcaklığı, geopolimer harçların çekme dayanımını etkileyen önemli faktörlerdir. 27°C' de kütleme yapılan geopolimer harçların, 60°C ve 90°C' de kütleme yapılan harçlardan daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sodyum hidroksit çözeltisi, sodyum alüminosilikat hidrat çözeltisine göre daha iyi çekme özelliği sağlamıştır (Ismail vd., 2016). Bhutta vd., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek çekme dayanımı, NaOH konsantrasyonundan bağımsız olarak sıcaklık kütleme altında elde edilmiştir ve 7 günlük ambiyans kütlemeyle elde edilen geopolimer harcın çekme dayanımı, NaOH konsantrasyonu arttıkça neredeyse %15 artmıştır.

2.1.3.3 Eğilme özellikleri

Geopolimer harçlar, yüksek çekme dayanımına sahip olsa da düşük basınç dayanımına sahip olabilirler. Bu durum, geopolimer pastanın agrega parçacıklarına mükemmel yapışması ve geopolimerin kırılabilirliğinden kaynaklanır. Kum miktarı, geopolimer harçların çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Steinerova, (2011) tarafından yapılan bir çalışma, kum ilavesinin artmasıyla birlikte geopolimer harçların çekme dayanımında artan bir eğilim olduğunu göstermiştir. Ancak kum miktarı %78' in üzerine çıktığında, bağlayıcı eksikliği nedeniyle taneler arasında iri gözeneklerin oluşmasına ve porozitenin artmasına neden olmuştur, bu da çekme dayanımını düşürmüştür.

Geopolimer harcın çekme dayanımı, alkali aktivatörün çözelti tipi ve iyileştirme sıcaklığı tarafından önemli ölçüde etkilenir. Huseien vd., (2016), sodyum alüminosilikat hidratin aktivatör olarak kullanılmasının, sodyum hidroksit çözeltisine kıyasla daha düşük çekme dayanımına neden olduğunu bulmuştur. Li vd., (2013) sonuçları, fırın iyileştirmesi ile üretilen C sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların en yüksek erken çekme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. F sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların erken çekme dayanımı ise standart iyileştirme ile kalsiyum hidroksit ve cüruf ilavesi ile iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Atis vd., (2015), farklı sodyum içeriklerini barındıran ve ısıtma sıcaklığı 45 ila 115°C arasında değişen farklı zamanlarda sertleştirilmiş olan geopolimer harçların eğilme dayanımının değişimini incelemiştir. En yüksek eğilme dayanımına sahip olan harcın %14 sodyum içeren ve 115°C'de 24 saat boyunca sertleştirilen harç olduğunu gösterirken, en düşük eğilme dayanımına sahip olan harcın ise %4 sodyum içeren ve 105°C'de 24 saat boyunca sertleştirilen harç olduğunu belirlemişlerdir. Dolaşım yataklı yanma taban külleri, geopolimer harçların üretiminde ince agrega olarak kullanılabilir. Taban küllerin UK oranı arttıkça, geopolimer harcın 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı önce artmıştır, ardından maksimum değere taban kül/UK oranının 1 olduğu noktaya ulaştıktan sonra azalma eğilimi göstermiştir (Chen vd., 2013).

Ban vd., (2017), öğütülmüş yakıt külünü aktivatör olarak kullanan geopolimer harç bloğu üzerinde bir araştırma yürütmüştür. Sonuçlarına dayanarak, sodyum silikat dozajı arttıkça daha yüksek derecede K-A-S-H ve N-A-S-H geopolimerik jel oluşumuna neden olduğundan, harç bloklarının eğilme dayanımının istikrarlı bir şekilde arttığını sonucuna varmıştır.

Ban vd., (2017), farklı seviyelerde yüksek kalsiyumlu odun külü tarafından UK değiştirildiği geopolimer harçların incelenmesini yürütmüş ve herhangi bir sertleştirme yöntemi uygulayarak geopolimer harçların eğilme dayanımının yüksek kalsiyumlu odun külü dozaj artışıyla azaldığını göstermiştir.

Nano-SiO₂ katkısının, geopolimer harçların eğilme mukavemeti üzerinde büyük bir güçlendirme etkisi olduğu bilinmektedir. Farklı molaritelerdeki aktivatör çözeltilerine sahip geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımı üzerinde nano silika etkisi

incelenmiştir. %6 nano silika içeren geopolimer harç, nano parçacıklar eklenmemiş harca kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir ve aktivatör çözeltisinin molar konsantrasyonu arttıkça harcın eğilme dayanımı giderek artmıştır (Adak vd., 2014). Lee vd., (2016), SB lateksinin eklenmesinin geopolimer harcının alkalinitesinin azalmasına rağmen, harcın eğilme dayanımını arttırdığını ve iri taban küllerin kullanımı nedeniyle harcın eğilme dayanımının arttığını göstermiştir. UK yerine YFC kullanılarak da geopolimer harçların eğilme dayanımı artırılabilir. Ortam sıcaklığında kür edilen harcın eğilme dayanımı, cürufun %10 ila %40 arasındaki oranında değişimiyle giderek artmıştır (Al-Majidi vd., 2016).

2.1.4 Geopolimer harcın dayanıklılığı

2.1.4.1 Sülfat direnci

Sülfat saldırıları, beton yapıların uzun vadeli dayanıklılığını en çok etkileyen çevresel bozulmalardan biridir. Köprüler, iskeleler, beton borular, temeller gibi birçok mühendislik yapısı, sülfat etkisi altında genleşme, çatlama ve bozulma riski taşır. Toprak, yeraltı suyu ve deniz suyundan gelen sülfat iyonları, sodyum, magnezyum, kalsiyum ve potasyum gibi diğer iyonlarla birleşerek agresif bileşikler oluşturur (Al-Akhras, 2006).

Magnezyum sülfat, sodyum sülfat, kalsiyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar, killi topraklarda, yeraltı sularında ve cürufle doldurulmuş arazilerde yüksek miktarlarda bulunabilir. Deniz suları da aynı şekilde önemli miktarda sülfat içerir. Bu tuzların sızdığı sular sertleşmiş betona girdiğinde, kimyasal reaksiyonlar sonucu beton genleşme ve çatlama eğilimi gösterebilir. Bu durum, özellikle beton yapıların dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir (Erdoğan, 2003).

Sülfat saldırıları genellikle, sülfat iyonları ile kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alümina hidratlar arasındaki reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna neden olmaktadır (Al-Akhras, 2006; Ramyar ve İnan, 2007). Bu sülfat saldırısı sonucu oluşan etrenjit ve alçıtaşı bileşenleri, başlangıçta reaksiyona giren maddelere bağlı olarak oldukça büyük hacimlerde olabilir. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumu, betonarme yapılarda genleşmeye, çatlak oluşumuna, bozulmalara ve parçalanmalara yol açabilir. Bu bileşenlerin oluşmasının ardından, sülfat saldırıları sonucu yıkanan kalsiyum bileşikleri, kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jelinin bozulmasına sebep olur. Bu süreç, C-S-H jelinin sertliğini kaybetmesine ve çimento matrisinin bozulmasına yol açar (Al-Akhras, 2006; Bulatović vd., 2017).

Betonun sülfat saldırılarına karşı direncini belirleyen temel bileşenler, çimentodaki serbest kireç (Ca(OH)_2), kalsiyum alüminat (C_3A) ve ferroalüminat fazlarıdır. Etrenjit ve alçıtaşı, çimento hidratasyonunun iki farklı kimyasal ürünüdür. Etrenjit oluşumu, hacim artışına neden olan bir genleşmeye yol açar. Eğer bu genleşme sınırlandırılmazsa, çatlaklara yol açabilir. Alçıtaşı oluşumu ise betonun ağırlığını ve dayanımını kaybetmesine ve rijitliğini yitirmesine yol açabilir (Wang vd., 2017).

2.1.4.2 Asit direnci

Geopolimer harcı, yeni bir yapı malzemesi olup yapısal bütünlüğü kalsiyum silikat hidrat bağlarına değil, alümina-silikat bağlarına bağlıdır. Birçok araştırmacı, geopolimer harçların asit direnci üzerine çalışmalar yürütmüştür. Thokchom vd., (2009), Na₂O içeriği %5 ila %8 arasında değişen geopolimer harçların, nitrik asit ve sülfürik asit içinde 24 hafta boyunca batırılmasının asit direncini değerlendirmek için deneyler yapmıştır. En yüksek Na₂O içeriğine sahip (%8) geopolimer harcı küçük basınç dayanımı kaybı gösterirken, sülfürik asit içine batırılan numunelerin dayanım kaybı nitrik asit içinde batırılan numunelere göre daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Sreevidya vd., (2013) sonuçları da, geopolimer harçların hidroklorik asit ve nitrik asit çözeltilerine son derece dayanıklı olduğunu, asit çözeltilerine batırılmadan önce ve sonra harçların basınç dayanımını karşılaştırarak gözlemlemişlerdir. Kim vd., (2014), asit batırma testleri yoluyla farklı sülfat ve asit çözeltilerine karşı geopolimer harçların direncini değerlendirmişlerdir ve aktif kalsiyum hidroksit varlığı nedeniyle sülfürik asit ve hidroklorik asite batırılan numunelerde büyük ağırlık kaybı gözlemlenmiştir.

Geopolimer harçların asit direnci üzerine çürütme sıcaklığı önemli bir etkidir. Djobo vd., (2016), 27°C'de sertleştirilen volkanik kül bazlı geopolimer harcın, 80°C'de sertleştirilen harca kıyasla sülfürik asit (%5) direncinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Erdogan (2015), farklı aktivasyon maddeleri kullanarak hazırlanan geopolimer harçların asit direncini karşılaştırmıştır ve sodyum hidroksit çözeltisiyle aktive edilen harcın sodyum silikatla aktive edilen harca göre sülfürik asit saldırısına daha dirençli olduğunu bulmuştur. Izzat vd., (2013), 120 gün boyunca %3 sülfürik asit içinde batırılan geopolimer harcın dayanım bozulmasının ve ağırlık kaybının beton harçtan daha düşük olduğunu bildirmişlerdir, bu da geopolimer harcın asit saldırısına dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ancak, Portland çimentosu içeriğinin artması, geopolimer harcın %10 sülfürik asit çözeltisine batırıldıktan sonra örneklerin ağırlık kaybının yüksek bir artışına neden olabileceğini belirtmişlerdir (Aguar vd., 2015). Satya vd., (2016), PYYK ve UK ile karıştırılarak üretilen geopolimer harçların, asidik suya karşı mükemmel direnç gösterdiğini ve UK ile hazırlanan geopolimer harcın, PYYK ile hazırlanan harca göre asidik torf suyuna karşı daha yüksek direnç gösterdiğini belirtmişlerdir. Geopolimer harcın asit direnci, nano-SiO₂'nin eklenmesiyle artırılabilir. %2 nano-SiO₂, nanomalzeme içermeyen harçlara göre asit çözeltisine batırılan örneklerin ortalama dayanım kaybı ve kütle kaybını belirgin bir şekilde azaltmıştır.

2.1.4.3 Su emilimi

Geopolimer harcın su emilimi, görünür porozite değeri ve gözenek boyutuna bağlıdır. Gorhan ve Kurklu, (2014), numunelerin 85°C sıcaklıkta termal olarak iyileştirildiği durumlarda iyileştirme süresindeki artışın, su emiliminde azalmaya neden olduğunu göstermişlerdir. NaOH çözeltisi konsantrasyonunun su emilimi üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir ancak ilgili etkinin tam olarak anlaşılmadığını ifade etmişlerdir.

Djobo vd., (2016), volkanik kütle üretilen geopolimer harcın su emilimini incelemişler ve örneklerin 27°C sıcaklıkta iyileştirilenlerden daha fazla su emdiğini bulmuşlardır. Su

emiliminin maksimum değeri 28 gün öncesinde ortaya çıkmıştır ve su emilimi, iyileştirme sıcaklığına bakılmaksızın sabit kalmıştır. Abdollahnejad vd., (2015), farklı tipteki geopolimer harçlarının su emilim kapilarite katsayısını ölçmüştür. Tek bileşenli geopolimer harçlarda, kalsine malzemenin bulunması nedeniyle büyük sayıda kapiler gözeneklerin varlığından dolayı çok yüksek kapiler su emilimi gözlemlendiği belirlenmiştir. Colangelo vd., (2016) çalışmalarının sonuçları, epoksi reçinesinin geopolimer harcın porozitesinin azalması nedeniyle su emilim kapasitesinde önemli bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Khater ve Gawaad, (2013), alkali aktive edilmiş geopolimer harcına ÇDKN katkısının su emilimi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. ÇDKN katkısına bakılmaksızın; geopolimer harçların su emilimi, iyileştirme süresinin artmasıyla sonraki dönemlerinde belirgin bir şekilde azalmıştır ve su emilimi, ÇDKN içeriği arttıkça artmıştır. Adak vd., (2014), farklı mol konsantrasyonlarına sahip %6 SiO₂ nano partikülleri içeren geopolimer harcın, nano SiO₂ içermeyen geopolimer harçlara kıyasla, 28 gün iyileştirildikten sonra daha az su emdiğini bulmuşlardır.

Yan ve Sagoe-Crentsil, (2012) atık kâğıt çamurunun su emme özelliği üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, çevre sıcaklığındaki suya batırılan numuneler ve kaynar suda batırılan numunelerin farklı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Suyu batırılan harçlar için, kâğıt çamuru dozajı %5'e kadar arttıkça su emme özelliği dramatik şekilde azalmıştır ve daha sonra %5'ten fazla kâğıt çamuru dozajı sonrasında hafifçe artmıştır. Ancak, su emme özelliği %10'a kadar kâğıt çamuru dozajının artmasıyla sürekli artmıştır.

Yliniemi vd., (2017) ise hafifletilmiş genişletilmiş kil agregalarının kullanımının geopolimer harcını su emme özelliğini etkilediğini bulmuşlardır. Hafifletilmiş genişletilmiş kil agregaları ile imal edilen numunelerin, geleneksel agregalarla imal edilen numunelerden daha fazla su emdiği gözlemlenmiştir.

Kurklu, (2016) ise UK ve YFC kullanarak geopolimer harçları hazırlayarak YFC dozajının termal kürlenme süresi üzerindeki etkisini farklı kürlenme süreleri (5 saatten 168 saate kadar) ile değerlendirmiştir. Farklı oranlarda uçucu kül içeren harçların su emme değerleri YFC içeriği arttıkça düzensiz bir şekilde değişmiştir ve en düşük su emme değeri YFC %100 içeren numunede 24 saat kürlenme sonrasında ortaya çıkmıştır. En yüksek su emme değeri ise 5 saat kürlenme sonrasında %25 içeren YFC numunelerinde görülmüştür.

2.1.5 Geopolimer harcın mikroyapısı

Haq vd., (2016), taban külü esaslı geopolimer harçların gözenek boyut dağılımının oldukça geniş olduğunu bildirmişlerdir. Bunun nedeni, taban kül parçacıklarının düzensiz şekle sahip olması ve farklı seviyelerde buhar basınçlarına neden olarak bitişik parçacıklar arasında düzensiz gözenekler oluşması olduğunu bildirmişlerdir. Taban kül bazlı geopolimer harçların SEM incelemesinden elde edilen sonuçlara göre, harç temel olarak reaksiyona girmemiş taban kül küreleri ve amorf alüminosilikat jelinden oluşmuştur. Ayrıca, taban külün çoğu parçacığı çözülmüş ve C-S-H jel haline dönüşmüştür (Thaarrini vd., 2015).

Sata vd., (2012) ise, sülfürik asit çözeltisinde 120 gün boyunca batırılmış olan geopolimer harçların EDX spektrum ve SEM incelemesine göre, ince taban külün, kaba taban külün aksine daha fazla hidrasyona ve kalsiyum ile ilgili geopolimerizasyona dayandığı için asit çözeltisi içinde daha kötü bir performans sergilediğini belirtmişlerdir. Kouamo vd., (2013), eritilmiş VK ile üretilen geopolimer harçların mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Eritilmiş VK'nın XRD deseni, bir dizi diopsit, anortoklaz ve müskovitin çözünebilir alüminosilikatlara dönüştüğünü göstermiştir. Bu da eritilmiş VK'nın ham VK'dan daha fazla reaktif faza sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, VK'nın reaktivitesini artırmak için alkali füzyonun uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılabilir. Sınıf C UK ile üretilen geopolimer harçların SEM mikroyapı incelemeleri, H₂O/UK oranına rağmen, bazı oldukça yoğun reaksiyon ürünlerinin harçlarda oluştuğunu göstermiştir (Li vd., 2013). Kim vd., (2014) yaptığı PKL bazlı geopolimer harçların floresan mikroskopi testleri, harçların homojen, sıkı ve daha yoğun bir parçacık dizilimine sahip olduğunu göstermiştir.

YFC içeren geopolimer harçların mikroyapısı, SEM/EDS analizlerinden elde edilen görüntülerle incelenmiştir. Düşük YFC dozajına sahip harçlarda, reaksiyona girmemiş UK parçacıkları ve daha az yoğun bir yapı gözlemlenirken, YFC dozajının artması, geopolimer harcın daha yoğun bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur.

Cyr vd., (2012), cam kırığından yapılan geopolimer harçların mikroyapısal karakterizasyonunu SEM, EDX ve XRD testleriyle analiz etmiştir. Eleman analizi sonuçları, C-S-H hidrasyon ürünleri ve geopolimer fazı içeren faz arasında kesin bir fark olmadığını göstermiştir. Faz değişim malzemesi içeren geopolimer harç örneklerinin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri, faz değişim malzemesi dozajının artmasıyla kırık yüzeyinde kırılan parçacık miktarının arttığını göstermiştir. Bu durum, faz değişim malzemesinin kayma dayanımının düşük olması nedeniyle faz değişim malzemesi parçacıklarının bir kısmının kayma süreci sırasında başarısız olabileceği anlamına gelmiştir (Shadnia vd., 2015).

Adak vd., (2014) Nano-SiO₂'nin eklenmesinin, geopolimer harçların morfolojisini değiştirebileceğini belirtmişlerdir. %6 SiO₂ nano-parçacıkları içeren geopolimer harcı, nano-parçacıkları olmayan geopolimer harçlardan daha fazla kristalin bileşik içerir. Nano-parçacıkların varlığı, büyük özel yüzey alanı ve amorf özellikleri nedeniyle, geopolimer harçların polimerizasyon sürecinde mükemmel bir iyileştirme sağlamıştır. Khater ve Gawaad, (2016), ÇDKN'nin cüruf geopolimer harçların mikroyapısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve %0,1 dozajındaki ÇDKN eklenmesinin harç kompozitinde yoğun ve sıkı bir yapı oluşturduğunu bulmuşlardır. ÇDKN dozajının artmasıyla birlikte, büyük miktarda agrega oluştuğu gözlemlenmiştir, bu da geopolimer harçtaki gözenekliliğin arttığını göstermiştir.

Arellano-Aguilar vd., (2014), farklı sıcaklıklarda kürlenmiş farklı geopolimer harçları incelemişlerdir. Sonuçları, 75°C' de kürlenmiş harçta tepkimeye girmemiş parçacıkların sayısının, 20°C'de kürlenmiş harçlara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, suyun hızlı buharlaşması nedeniyle mikroporların oluştuğu ve reaksiyonların 20°C' den 75°C' ye yükselen kürlenme sıcaklığıyla hızlandığı tespit edilmiştir. Abdulkareem vd.,

(2014), yüksek sıcaklıklara maruz kalmış ve kalmamış geopolimer harçların mikroyapısını SEM mikrografileri ile incelemişler ve 400°C'ye maruz kaldıktan sonra mikroyapının görünümünde hafif bir değişiklik olduğunu bulmuşlardır. Ancak, yapısal suyun 600°C'de buharlaşması, geopolimerik jel noktalarında bazı küçük mikro çatlaklara neden olmuş ve bu da harcın dayanımının azalmasına yol açmıştır. Bu mikro yapı hasarı, sıcaklık arttıkça 800°C'ye kadar artarak daha da ciddi hale gelmiştir.

Erdogan, (2015) tarafından yapılan NMR, FTIR ve XRD analizleri, su camı ile aktive edilen geopolimer harçların NaOH çözeltisi ile aktive edilen harçlara göre daha az geopolimerleşme deneyimlediğini göstermiştir. Farklı aktifleştiriciler kullanılarak hazırlanan geopolimer harçların FESEM mikrografilerinden, sodyum silikat çözeltilerinin kullanıldığı harcın kırılğan matris ve daha az yoğunluğa sahip olduğu ve bileşimde kısmen reaksiyona ve tepkimeye girmemiş UK ve PYKK parçacıkları olduğu görülmüştür (Ismail vd., 2016). Portland çimentosu ve kalsiyum karbür artığı ile aktive edilen geopolimer harçların mikro yapısının XRD, SEM ve FTIR analizi sonuçları, kalsiyum karbür artığının kullanımının Portland çimentosu kullanımına göre daha az reaksiyon ürünü oluşturduğunu göstermiştir (Hanjitsuwan, 2017).

2.2 Yüksek Fırın Cürufu

YFC, demir üretim sürecinden elde edilen bir yan üründür (Siddique ve Bennacer, 2012). İstatistiksel olarak, 1000 kg demir üretimi için yaklaşık 300 kg erimiş cüruf boşaltılır (Yüksel, 2018). YFC'nin, erimiş cürufun farklı soğutma yöntemlerine göre farklı tipleri bulunur. Erimiş cüruf, su soğutmasıyla hızlı bir şekilde soğutulduğunda yüksek cam içeriğine ve hidrasyon etkinliğine sahip olur. Son yıllarda, su soğutmalı YFC (genellikle GYFC olarak adlandırılır), çimento ve beton endüstrisi (Hu ve Poon, 2022; Naresh ve Saravanan, 2022; Yoon vd., 2021), geopolimerler (Rautaray vd., 2022), beton agregaları (Shi vd., 2021), cam seramikleri (He vd., 2018), atıksu arıtma (Dhmees vd., 2018) ve tarımsal gübreler (Lim vd., 2022) gibi birçok alanda yaygın olarak uygulanmıştır. YFC'nin çimentoda kullanımı, diğer bileşenlerin etkili şekilde yer değiştirmesi nedeniyle çimento endüstrisinin CO₂ salınımını azaltırken daha iyi performans sağlayabileceğini belirtmişlerdir (Özbay vd., 2016).

Ancak çimento endüstrisi ile çelik endüstrisi arasındaki büyük kapasite farkı nedeniyle, YFC arzı çimento endüstrisinin talebini karşılamaktan uzaktır ve bazı ülkeler taleplerini karşılamak için ithal YFC'ye bağımlı hale gelmiştir. Ayrıca, çimento ve beton endüstrisinde kullanılan S95 YFC'in (Çin standardı olarak geniş bir şekilde tanımlanır; YFC çimentoya 1:1 oranında karıştırıldığında, 28 günlük basınç dayanımı saf çimentonun en az %95'ine ulaşabilir) fiyatı, çimentonun fiyatına yakındır ve S105 YFC fiyatı hatta çimentonun fiyatını aşmaktadır. YFC, günümüzde kıt kaynaklı değerli bir kaynak haline gelmiştir ve çimento ve betonun maliyetini düşürmek için belirgin bir avantaj sunmamaktadır.

Çimento endüstrisi, YFC yerine benzer özelliklere sahip alternatiflere artan talep nedeniyle karşı karşıyadır. Endüstrileşmenin gelişmesiyle birlikte, özellikle kırmızı çamur (Khairul vd., 2019), iyileştirme jipsi (Liu vd., 2021), uçucu kül (Giergiczny, 2019; Xue ve Liu, 2021) ve bakır cürufu (Zhang vd., 2022) gibi birçok katı atık üretilmiş ve stoklanmıştır ve

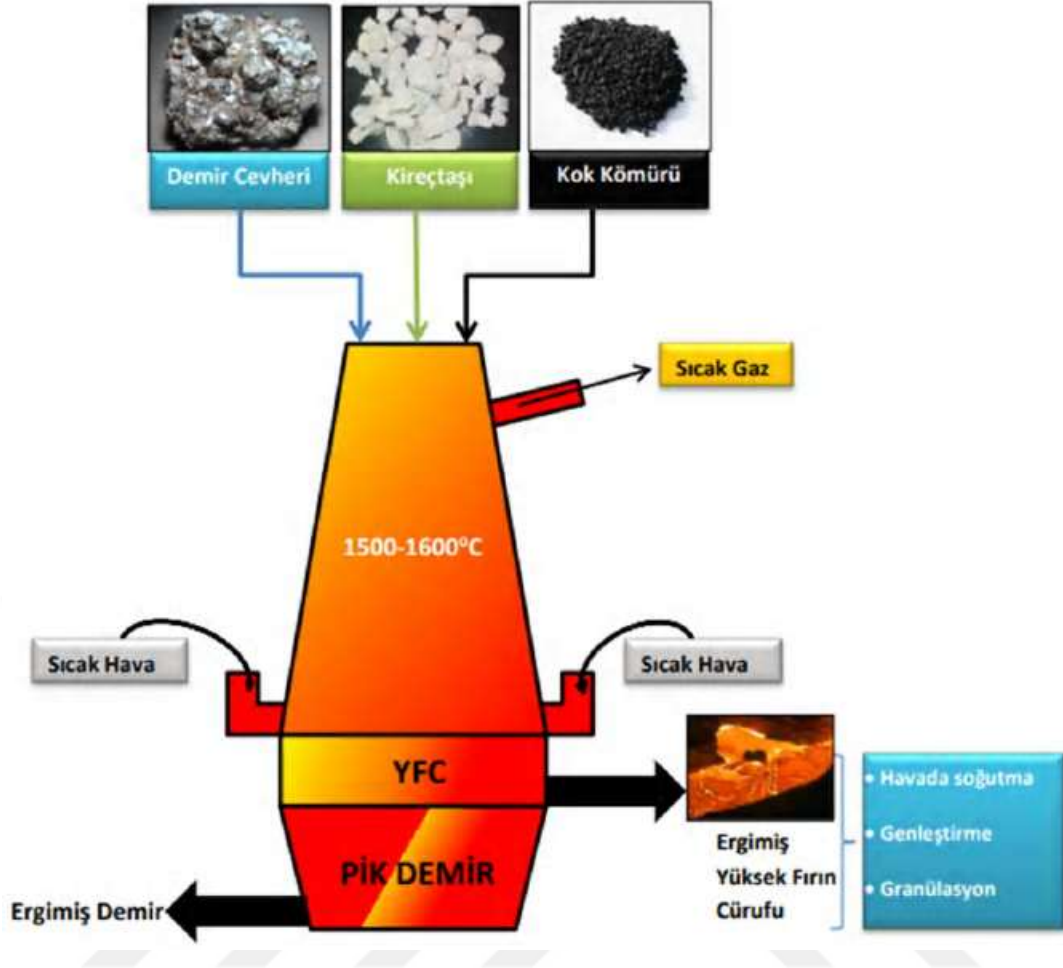
bunların acilen bertaraf edilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Çin'de kırmızı çamurun yıllık üretimi hızla artmakta, ancak kapsamlı kullanım oranının %4'ten az olduğunu belirtmişlerdir (Mengfan ve Xiaoming, 2021; Wang vd., 2021) (Bullerjahn ve Mehringskötter, 2021). Çin' de 2021 yılında ham çelik üretimi 990 milyon tondur ve 190-220 milyon ton civarında çelik cürufu üretilmiştir, ancak kullanım oranı %29,5' tir. UK ve jips için de benzer durum geçerlidir. Katı atık sürekli olarak boşaltıldığı için, genel kullanım oranı azalmıştır. Örneğin, ABD' de jips kullanım oranı 2006' dan bu yana giderek azalmıştır (Koralegedara vd., 2019). Endüstriyel katı atık üretimi sürekli arttığından, arazi kaynaklarının işgal edilmesi ile su/hava/toprak kirliliği gibi çevresel sorunlar giderek daha ciddi hale gelmiştir (Agrawal ve Dhawan, 2021; Liu vd., 2021), bu da çevre ve insan sağlığına ciddi tehditler oluşturmuştur.

Büyük ölçekte katı atıkları bertaraf edebilecek bir yöntem acilen gerekmektedir. Katı atıklar uygun bir yöntem olarak kompozit YFC'in hazırlanmasında kullanılabilir. Ancak, literatür taraması, çok az sayıda çalışmanın YFC benzeri özelliklere sahip çimento malzemelerinin hazırlanmasına odaklandığını ortaya koymuştur. Bazı çalışmalar, katı atıklar ve YFC karışımının daha iyi özelliklere sahip olduğunu bulmuştur. Kompozit YFC'nin başarılı bir şekilde hazırlanması için, katı atıklar ve YFC arasındaki sinerjistik etkilerin tartışılması gerekmektedir. Sinerjistik etki, dört temel yönü içerir: alkali, sülfat ve parçacık dolgulama etkileri. Bu etkiler sayesinde YFC'nin hidrasyonu önemli ölçüde teşvik edilebilir. Lemougna vd., (2017), Jiang vd., (2018), Shubbar vd., (2018), ve Xu vd., (2019), Min vd., (2021) gibi araştırmalar da bu konuda benzer sonuçlar göstermiştir.

Üçlü veya daha fazla sistemlerde ise birden fazla sinerjistik etki bulunur ve daha iyi özellikler elde edilebilir. Bu nedenle, katı atıkların bir kısmı veya tamamının YFC'nin yerini alması kompozit YFC hazırlamak için yeni bir bakış açısı sağlamayı amaçlamaktadır. Kompozit YFC, çimento, harç ve betonda kullanıldığında yüksek kaliteli YFC talebini etkili bir şekilde hafifletmenin yanı sıra diğer katı atık kullanım oranlarını artırabilir ve sektörler arası iş birliğini teşvik edebilir.

2.2.1 YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

YFC, demir üretim sürecinde yan ürün olarak oluşur. Demir cevheri, kok ve kireç taşı karışımı bir fırında 1500°C'de reaksiyona sokulur ve demir cevherindeki demir oksitler indirgenirken erimiş demir ve cüruf fırının altında birikir. Cürufun daha düşük yoğunluğu nedeniyle, demirin üstünde yüzer ve çıkarıcıda kolayca ayrılabilir (Siddique ve Bennacer, 2012; Yuksel, 2018). Erimiş cüruf, soğutma için farklı yöntemler kullanılarak kristalin bir yapıda yol yapımı ve betonda agregalar olarak kullanılacak bir kitleye dönüştürülebilir. Hızlı soğutma yöntemiyle elde edilen YFC, cam benzeri taneli bir üründür ve genellikle çimento ve beton endüstrisinde ilave çimento malzemesi olarak kullanılır.



Şekil 2.1: Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (Engin, 2015)

2.2.1.1 Fiziksel özellikler

YFC'nin renk tonu, nem içeriği, kimyasal bileşimi ve diğer faktörlere bağlı olarak gri ile soluk beyaz arasında değişebilir (Dai, vd., 2019). YFC tanecik boyutu genellikle 5 mm'den daha azdır ve cam içeriği %85-90 arasındadır. Daha ileri kurutma ve öğütme işlemlerinden sonra granüle edilmiş YFC ince bir toza dönüşür ve öğütülmüş YFC olarak adlandırılır. Öğütülmüş YFC'nin maksimum tanecik çapı 100 μm 'den azdır. D50 ortalama çapı yaklaşık 13-15 μm 'dir ve bu, çimento tanecikleri ile benzerlik gösterir.

2.2.1.2 Kimyasal bileşim

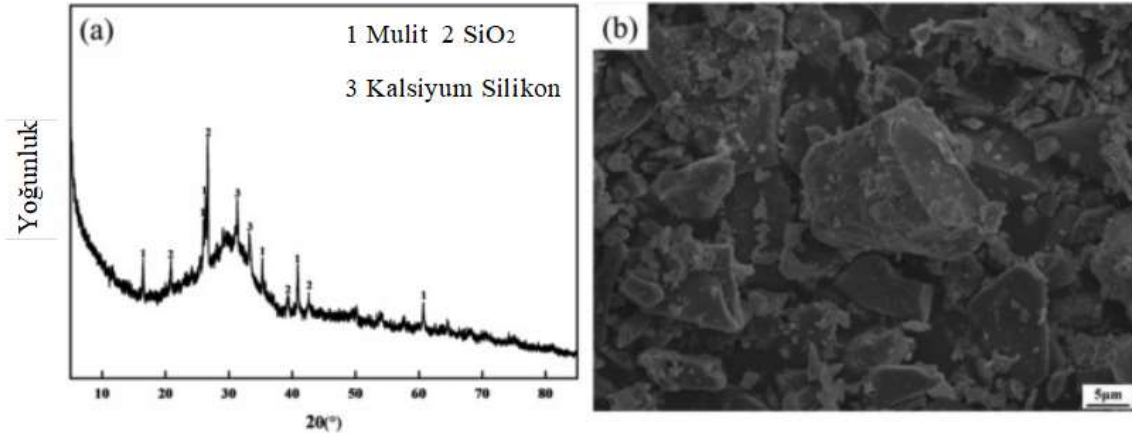
YFC, temel olarak silikatlar ve alüminatlar ile bağlantılıdır ve başlıca kimyasal bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO vb.'dir. Toplam kimyasal bileşimde, bu bileşenler genellikle ağırlık olarak %90'dan fazlasını oluşturur. Bunun yanı sıra, Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 ve bazı sülfürler de içerir, örneğin kalsiyum sülfür ve demir sülfür. Ham madde bileşimindeki farklılıklar, eritme işlemleri ve soğutma yöntemleri, YFC bileşiminde bazı farklılıklara neden olur. Çizelge 2.2, bazı ülkelerde YFC'nin kimyasal bileşimini Portland çimentosu ile karşılaştırarak özetliyor ve YFC'nin kimyasal bileşimi genellikle çok fazla değişmez.

Çizelge 2.2: Ülkelerin YFC kimyasal içeriklerinin portland çimentosuyla karşılaştırılması
(National Slag Association Publication)

Oksit Cinsi	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO (%)	29 - 50	30 - 40	38 - 44	34 - 41	60 - 67
SiO ₂ (%)	30 - 40	30 - 36	33 - 37	34 - 36	17 - 25
Al ₂ O ₃ (%)	7 - 18	9 - 16	15 - 18	13 - 19	3 - 8
Fe ₂ O ₃ (%)	0,1 - 1,5	-	0 - 0,7	0,3 - 2,5	0,5 - 6
MgO (%)	0 - 19	8 - 21	1 - 3	3,5 - 7	0,1 - 4
MnO (%)	0,2 - 1,5	-	0,3 - 1,5	1 - 2,5	-
S (%)	0 - 2,0	1 - 1,6	0,6 - 0,8	1 - 2	-
SO ₃ (%)	-	-	-	-	1 - 3

2.2.1.3 Mineral bileşimi ve mikroskobik karakterizasyon

Hızlı soğutma koşulları nedeniyle, YFC öncelikle cam benzeri bir malzemedir. Şekil 2.2 (a) 'da gösterildiği gibi, YFC'nin XRD deseni, 20 ° -40 ° aralığında bir "tümsek" tepe içerir (Wang, vd., 2022), bu da YFC'de büyük bir amorf faz bölümü olduğunu gösterir. Şekil 2.2(b)'den de görülebileceği gibi, YFC partikülleri keskin köşelere sahip düzensiz bir yapıya sahiptir. Bu, YFC'nin öncelikle amorf yapıya sahip bir latent hidrolik malzeme olduğunu gösterir.

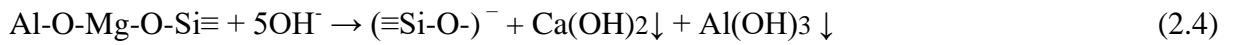
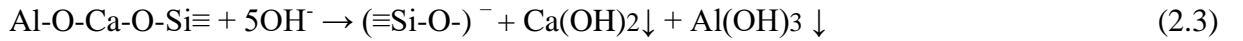
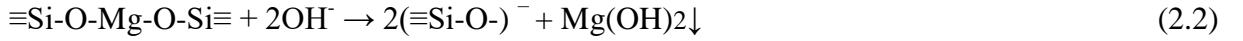
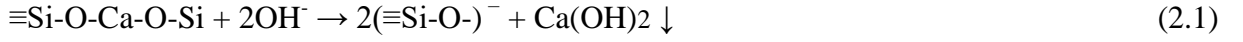


Şekil 2.2: YFC'nin XRD deseni (a) ve SEM fotoğrafı (b)

2.2.1.4 Hidrasyon mekanizması

YFC su ile hızlı soğutma nedeniyle minerallerin kristalleşecek kadar zamanı olmadığından, çoğunlukla camlı bir malzeme olarak kabul edilmiştir ve yüksek bir potansiyel hidrasyon aktivitesine sahip olduğu belirtilmiştir (Yuksel, 2018). Genel olarak, YFC'nin camlı yapısı

farklı oksitlerin (CaO, Al₂O₃, SiO₂, vb.) her yönde oluşan bir uzay ağı yapısı olarak kabul edilir, yani rastgele bir dağılım modeline sahiptir. YFC'nin camlı yapısında, Na⁺, Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonları, camlı yapıdaki uzayda tamamen düzensiz olarak dağılmıştır. Ancak, alkali sulu bir ortamda camlı yapının çözünmesi gerçekleşir ve SiO₄⁴⁻ ve AlO₄⁵⁻ yeniden düzenlenerek C-S-H jel, C-A-S-H jel ve diğer hidrasyon ürünlerini oluşturur. Ayrıca, YFC'de silika fakir fazlar ve silika zengin fazlar bulunur. YFC yüzeyindeki silika fakir fazlar, alkali çözeltisiyle ilk olarak aşağıdaki denklemlere göre reaksiyona girer:



OH⁻ iyonları ile silika-zengin fazın reaksiyonu ise daha yavaştır. Daha ince parçacıklardaki silika-zengin fazın, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂ ve Al(OH)₃ tarafından sarılarak topak halindeki mikropartikülleri oluşturabileceği ve bunların YFC yüzeyinde biriktiği düşünülmektedir. Ardından silikon, alüminyum ve silika-zengin fazdan ayrılan kalsiyum, C-S-H ve C-A-S-H gibi jel maddeleri oluşturacak şekilde yeniden düzenlenecektir. Reaksiyonlar ise şöyledir:



2.2.2 Hidrasyon aktivasyon yöntemi

2.2.2.1 Fiziksel aktivasyon

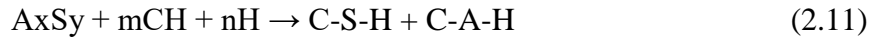
YFC'nin hidrasyon süreci, cüruf yapısının ayrışması, iyonların çözünmesi, kimyasal reaksiyonların oluşması ve diğer süreçleri içerir. Son araştırmalar, YFC'nin özel yüzey alanının büyük ölçüde hidrasyon aktivitesi üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle; öğütme yoluyla fiziksel aktivasyon, YFC'nin özel yüzey alanını ve iyon çözünmesi ile hidrasyon reaksiyon hızını artırabilir. Öğütme sonrası, YFC'nin özel yüzey alanı artar ve yüzeyinde mikro çatlaklar oluşur. Bu durum, çözeltideki moleküllerin veya iyonların camı yapısının içine girmesini kolaylaştırır ve reaksiyon hızını artırır. Ayrıca, küçük partiküller dolgu etkisi yapar, iç yapıdaki gözenekliliği azaltır ve çimento harcının basınç dayanımını artırır (Dai, vd., 2019).

2.2.2.2 Kimyasal aktivasyon

Asitler, alkali ve tuzlar gibi kimyasal aktivatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktivatörler genellikle üç şekilde etki eder: YFC cam yapısının çözünürlüğünü artırır, stabil hidrasyon ürünleri oluşturur ve ağ yapısının oluşumunu kolaylaştırır. Asit ile işlenmiş cüruf, Ca^{2+} , Mg^{2+} ve Al^{3+} iyonlarının büyük bir kısmının çözünmesi nedeniyle daha gözenekli bir yapıya sahip olur, ancak hidrasyon aktivitesi yoktur. Bu nedenle, asit işlemi YFC ve çimento sistemlerinin erken mukavemetini artırsa da uzun vadeli mukavemet önemli ölçüde azalacaktır. Bu nedenle, asit işlenmiş YFC genellikle endüstriyel atık suyun arıtılmasında kullanılır. Alkali aktivasyondan sonra, YFC önemli bir hidrasyon aktivitesi gösterebilir. YFC cam yapıları çözünür, aktif silikat ve alüminat iyonları serbest bırakır ve hidrasyon ürünlerinin oluşumunu teşvik eder. Bu hidrasyon ürünleri çekirdeklenir, büyür ve birbirine bağlanarak karmaşık 3D ağ yapısı oluşturur. Bu hidrasyon ürünleri ayrıca yoğun bir mikro yapı oluşturabilir, gözenekliliği azaltabilir ve basınç dayanımını artırabilir. Tipik olarak, sülfat tuzları YFC'yi aktive etmek için kullanılabilir, ancak sadece alkali ortamda, çünkü alkali koşullar AlO_4^{5-} ve SiO_4^{4-} 'ün YFC'den çözünmesini teşvik edebilir. Bunlar Ca^{2+} ve SO_4^{2-} ile reaksiyona girerek C-S-H, C-A-S-H ve etrenjit oluşturur. Bu da YFC'nin daha fazla hidrasyonunu önemli ölçüde teşvik edecektir.

2.2.2.3 Yüksek fırın cürufunun çimento ve beton endüstrisi

Çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılan katkı malzemeleri, puzolanik aktiviteli minerallerdir. Bu mineraller, sadece suyla karıştırıldığında önemli bir çimento aktivitesi göstermezler. Ancak alkalik koşullar altında veya alkali ile temas halinde, "puzolanik reaksiyon" olarak bilinen bir kimyasal reaksiyon geçirirler ve çimento hidrasyonuna benzer hidrasyon ürünleri oluştururlar (Siddique ve Bennacer, 2012). Genelleştirilmiş bir puzolanik reaksiyon şöyledir (Gartner, 2004):

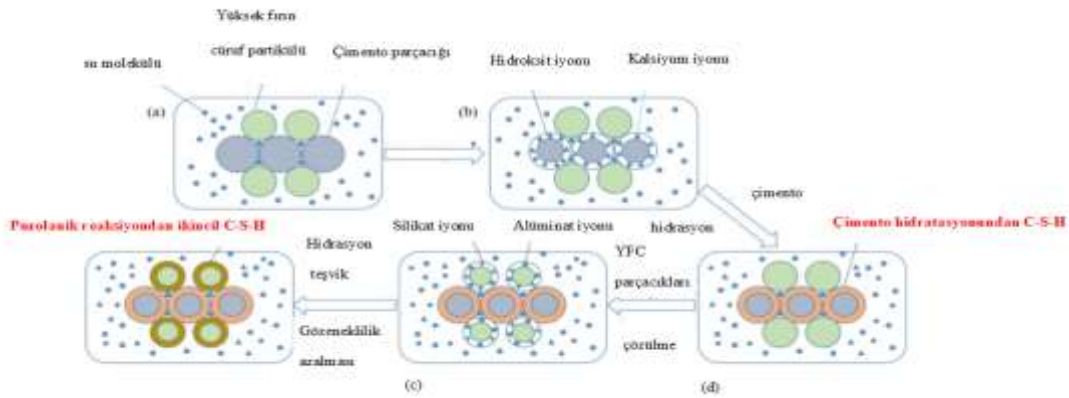


Çimento endüstrisinde sıklıkla kullanılan YFC, çimento ile benzer kimyasal bileşime sahiptir. Ayrıca, potansiyel bir çimento aktivitesine sahip olduğundan, YFC'nin çimentoda kullanımı mekanik özellikleri artırır. YFC'nin diğer uygulamaları arasında tarım gübresi (Lim, vd., 2022) ve atık su arıtımı (Dhmees, vd., 2018; Li, vd., 2020; Shao, vd., 2018; Verma, vd., 2019) yer almaktadır. Çevresel, ekonomik ve özellikler açısından faydaları nedeniyle, YFC, çimento endüstrisinde en sık kullanılan katkılı çimento malzemelerinden biridir. YFC, mineral katkı maddesi veya harmanlanmış çimentonun bir bileşeni olarak kullanılabilir gibi (Yuksel, 2018), çimento endüstrisinde CO_2 salınımını %30-40 azaltabilir. Ayrıca, YFC eklenmesi çimentonun dayanımı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği gibi özelliklerinde istikrarlı bir artışa neden olur. YFC'nin hidrasyonu, Portland çimentosunun hidrasyonu ile açığa çıkan hidroksil iyonları tarafından camımsı cüruf yapısının çözünmesine bağlı olduğunu söylemişlerdir (Pal, vd., 2003).

YFC, kalsiyum hidroksit tüketir (Gao, 2005) ve puzolanik reaksiyon yoluyla ek C-S-H jel oluşturur. Gao vd., (2005), YFC'nin %40 oranında Portland çimentosu yerine kullanıldığı

durumlarda, puzolanik reaksiyonun erken hidrasyon safhasında kalsiyum hidroksit tüketimine neden olduğunu bulmuşlardır. Bu nedenle, YFC katkılı çimentoda, YFC'nin hidrasyon ürünleri temel olarak saf çimento hidrasyonu ile üretilenlerle aynıdır.

Hidrasyon sürecinde, çimento partikülleri çözülmeye başlar ve hidroksit iyonları ve kalsiyum iyonları çimento partiküllerinin yüzeyinden çözülmeye başlar ve büyük miktarda silikat ve alüminyum iyonları salar. Şekil 2.3, YFC partiküllerinin daha fazla hidrasyon gösterdiğini, silikat ve alüminyum iyonlarının miktarını keskin bir şekilde artırdığını ve ikincil C-S-H'nin puzolanik reaksiyon yoluyla oluştuğunu göstermektedir. Hidrasyon sürecinde, mikro yapının son porozitesi azalır.



Şekil 2.3: Çimento ile harmanlanmış yüksek fırın cürufu için hidrasyon prosesinin şeması

2.2.4 YFC arasında sinerjik kullanım ve mekanizma analizi ve katı atıklar

2.2.4.1 Kompozit yüksek fırın cürufunun hazırlanması ve katı atıklar ve YFC arasındaki sinerjik mekanizma

YFC, çimento ve inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta olan mükemmel hidrasyon özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak YFC'nin arzı, talebi karşılamakta zorlanmaktadır. Bu sorun, sanayileşmenin hızlı ilerlemesiyle birlikte çeşitli katı atıkların (kırmızı çamur, ÇÇ, UK, alçı vb.) artan bir üretimine neden olmuştur. Bu durum, çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle, YFC ile farklı katı atıklar arasındaki etkileşim mekanizmasını keşfetmek acil bir ihtiyaçtır. Böylece, YFC'nin bir kısmı katı atıklarla değiştirilerek, kompozit fırın cürufu hazırlanabilir. Genel olarak, birçok endüstriyel atık, YFC ile benzer özelliklere ve bileşenlere sahiptir. Bu da, çimento uygulamalarında YFC'nin yerini alabilecekleri anlamına gelir. Dahası, katı atıklar ile YFC arasında sinerjistik etkiler vardır ve belirli bir oranda daha iyi hidrasyon özelliklerine sahiptirler. Eğer endüstride başarılı bir şekilde kullanılırlarsa, YFC talebi azaltılabilir ve birçok katı atığın değerlendirilmesi için yeni bir yol sağlanabilir. Daha fazla katı atık kullanımı için, farklı endüstrilerden gelen YFC ve katı atıklar arasındaki sinerjistik

mekanizmanın anlaşılması gereklidir. Sinerjistik mekanizma, temel olarak şu yönlerde ortaya çıkmaktadır:

(1) Alkali atık maddelerle olan sinerji (örneğin kırmızı çamur ve karbür cürufu vb.). $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinin oda sıcaklığında pH'ı 12.45 olduğundan (Fraay, vd., 1989), çimento hidrasyonu sonucu oluşan alkalik ortam YFC'nin tam hidroliz için yeterince güçlü değildir. Bu nedenle, katı atıkta bulunan ek güçlü alkalik bileşenler, çözeltilerin pH'ını yükselterek YFC'nin çözünürlüğünü artırabilir ve daha fazla aktif silikat ve alüminyum iyonu serbest bırakabilir.

(2) Sülfat katı atık maddelerle olan sinerji (çözelti jipsi, elektrolitik mangan cürufu vb.). Bu temel olarak sülfatın Ca^{2+} ve SO_4^{2-} sağlayarak YFC hidrasyonunu teşvik etmesiyle oluşur, bu da SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} ile reaksiyona girerek C-S-H jel ve etrenjit oluşturur.

(3) Partikül doldurma etkisi. Katı atığın ince partikülleri matris dolgu maddesi olarak hareket edebilir ve hidrasyon ürünlerinin mikro yapı porozitesini azaltacaktır.

(4) Sülfat, alkalik ve partikül doldurma etkileri arasındaki sinerjistik aktivasyon. Yukarıdaki üç mekanizmanın sinerjisi genellikle tek bir mekanizmadan daha iyi performans elde etmemizi sağlayabilir.

Ayrıca, çimento bazlı malzemelerin $\text{Ca} / (\text{Si} + \text{Al})$ oranı, hidrasyon ürünü C-S-H'in moleküler zincir uzunluğunu etkiler. Bu nedenle, $\text{Ca} / (\text{Si} + \text{Al})$ oranı, YFC ve diğer katı atıklar arasında sinerjistik etki elde etmek için belirli kütle oranlarını seçmek için rehberlik sağlayabilir.

2.2.4.2 Kırmızı çamur ve YFC'nin sinerjik kullanımı

Şekil 2.3'te belirtildiği gibi, YFC alkali bir ortamda çözünebilir ve silikat ve alüminat iyonları salabilir. Ancak, çimento tarafından oluşturulan alkali ortam yeterince güçlü değildir. Bu nedenle, YFC'nin çözünme hızı, çimento-YFC sisteminin erken hidrasyon aşamasında düşük sıkıştırma dayanımının ana nedenidir. YFC'nin çözünme hızını artırmak için, hidrasyon ortamının pH değerini artırmak uygun bir yöntem olabilir. Kırmızı çamur, alümina üretiminde alüminyum endüstrisinin bir yan ürünüdür (Wang ve Liu, 2021). Yüksek bir pH değeri olan yaklaşık 11.5-13'lük bir alkali katı atıktır (Rai, vd., 2020). Şu anda, kırmızı çamur kullanımıyla ilgili temel sorun, yüksek alkaliliğin, ağır metal içeriği ve düşük hidrasyon aktivitesi ile ilgilidir. Kırmızı çamur çimentoda kullanıldığında, eklenen miktar %10'dan az olmalıdır veya sıkıştırma dayanımında keskin bir düşüşe neden olur. Daha önce belirtildiği gibi, kırmızı çamurun yüksek alkaliliği uygulamasını sınırlamaktadır. Ancak, YFC, Ca^{2+} , AlO_4^{5-} ve SiO_4^{4-} iyonlarını salmak için alkali bir ortama ihtiyaç duyar (Xu, vd., 2019).

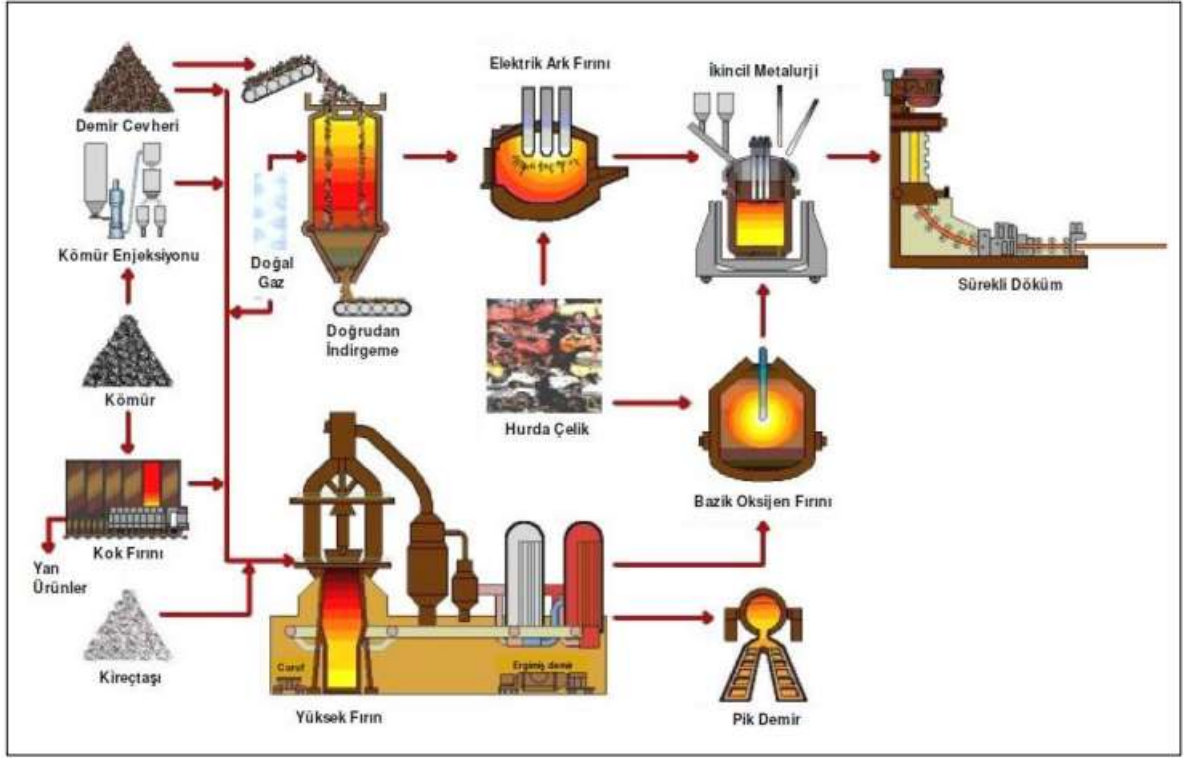
Kırmızı çamur ve YFC alkali bir ortamda sinerjik bir etki gösterir. Aynı alkali ortamda, kırmızı çamur YFC'nin bir kısmını yerine geçirdiğinde, kırmızı çamur ilavesi olmadan veya daha iyi fiziksel özellikler gösterir. Bunun iki açıklaması vardır. Bir nedeni, kırmızı çamurun daha küçük parçacık çapı ve daha büyük özgül yüzey alanıdır, bu da parçacık doldurma, gözenek hacmini azaltma ve mikroyapıyı daha yoğun hale getirme açısından

önemli bir rol oynar (Bayat, vd., 2018). Li vd., (2021) tarafından gösterildiği gibi, özgül yüzey alanı reaktivite ile ilişkilidir. Bu çalışmada, ince ve kalın kırmızı çamurun çözünme hızları karşılaştırılmış ve sonuçlar ince parçacıkların Al^{3+} ve Si^{4+} iyonlarını daha yüksek bir hızda çözdüğünü göstermiştir. Bu, ince kırmızı çamurun daha yüksek reaktiviteye sahip olduğunu, muhtemelen daha büyük bir özgül yüzey alanına ve daha fazla aktif bölgeye sahip olmasından kaynaklandığını göstermiştir. Başka bir önemli neden, kırmızı çamurdaki alkalinin YFC'nin çözünmesini teşvik edebilmesidir. Kırmızı çamurdaki Na^+ , YFC'teki silikat ve alüminat iyonları ile reaksiyona girerek hidrasyon sürecinde N-A-S-H jel oluşumuna neden olabilir. Ayrıca, ikincil bir hidrasyon reaksiyonunu da teşvik edebilir. YFC'deki silikat ve alüminat iyonları ile çimento içindeki $Ca(OH)_2$ arasındaki reaksiyon, ek C-A-S-H jel oluşumuna neden olabilir (Zhang vd., 2022).

Kırmızı çamur ve YFC arasındaki sinerjik etki olumlu olsa da, yüksek kırmızı çamur içeriği çimentonun basınç dayanımında önemli bir azalmaya neden olur. Bu, aktif silika-alümina toplam miktarının düşmesinden kaynaklanır ve hidrasyon ürünlerinin azalmasına yol açar. Ayrıca, yüksek kırmızı çamur ilavesi matris porozitesinde artışa, hamur akışkanlığında azalmaya ve alkali seviyesinde yükselmeye neden olur. Bu faktörler, çimento dayanımının gelişimine zarar verir. Kırmızı çamurun reaktivitesini artırmak için termal aktivasyon uygun bir yöntemdir. Önceki deneysel çalışmalar, kırmızı çamurun $600^{\circ}C$ 'de kalsine edilmesinin düşük kristalize Ca_2SiO_4 oluşturduğunu gösterir, bu da iyi çimento aktivitesine sahiptir. Ancak, kırmızı çamurun ekonomik maliyeti yüksek olduğundan, bazı YFC'leri değiştirmeden önce termal aktivasyonun maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Kırmızı çamurun büyük ölçekli endüstriyel uygulamaları için uygun olmadığı görülmektedir. Kırmızı çamurun büyük ölçekli endüstriyel uygulaması hedeflendiğinde, diğer katı atıkların kırmızı çamur-YFC sistemi içine eklenmesi uygun bir yaklaşım olabilir. Kapsamlı araştırmalar, diğer katı atıklar ve YFC arasında sinerjik etkiler olduğunu göstermiştir. Bu, hem katı atıkların daha fazla kullanımına hem de farklı endüstriler arasında kaynakların geri dönüşümünü teşvik edebilir.

2.2.4.3 Çelik cürufu ve YFC'nin sinerjik kullanımı

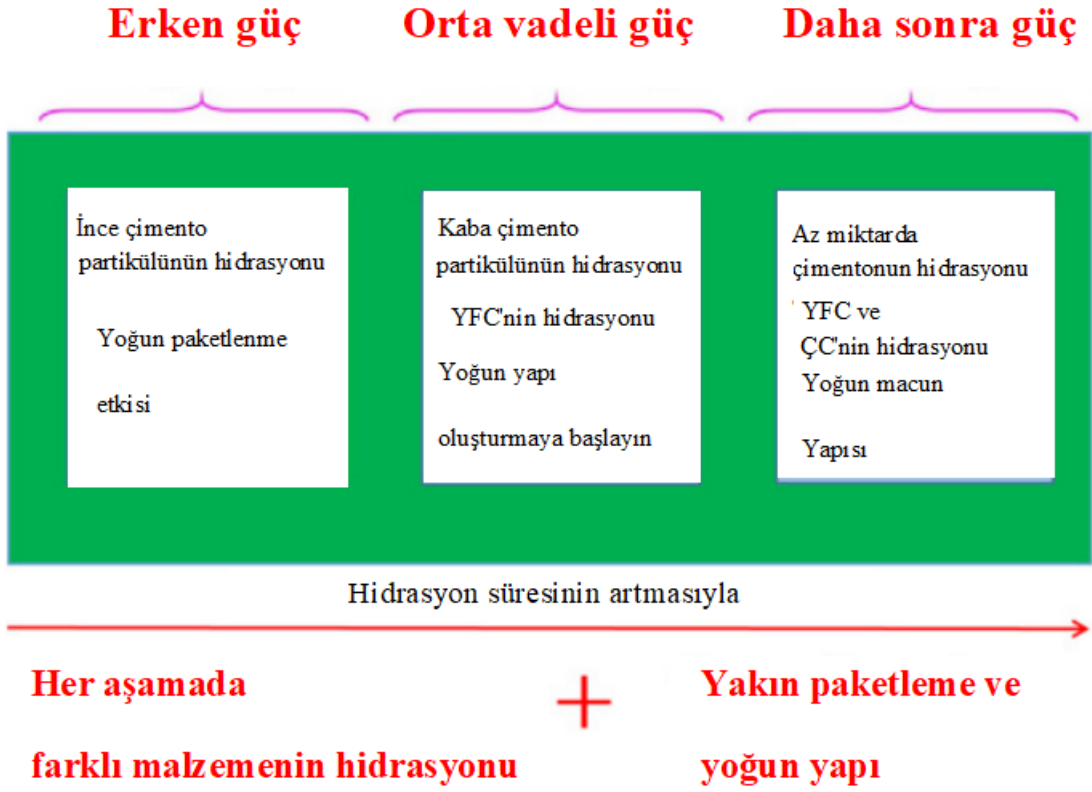
Çelik cürufu, temel oksijen fırını veya elektrik ark fırını işlemiyle çelik üretiminin bir yan ürünüdür ve kimyasal ve mineral bileşimleri çimento ile benzerlik gösterir. Bu nedenle çimento ve beton endüstrisinde kullanım potansiyeli yüksektir. Ancak, f-MgO ve f-CaO içeriğinin yüksek olması hacim genişlemesine neden olur ve bu da çimento malzemelerinde kullanım oranını sınırlar (genellikle ağırlıkça oranı $<10\%$). ÇC tek başına çimento için ideal değildir, ancak YFC ile mükemmel bir sinerjik etki gösterir. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, YFC ve çelik cürufu, demir-çelik üretim sürecinin farklı aşamalarında üretilen iki yan üründür ve bir çelik tesisi için atıkların birikimini azaltmak ve kullanım oranını artırmak için sinerjik olarak kullanılabilir.



Şekil 2.4: Demir-çelik üretim süreci (Dündar,2006)

YFC varlığı, çelik cürufundaki f-MgO veya f-CaO bileşenleriyle hidrasyon ürünleri oluşturarak geç hidrasyonda reaksiyona girer ve çimento malzemelerinde çelik cürufunun olumsuz etkilerini azaltır. Bu olumsuz etkiler arasında zararlı gözeneklerin oluşumu ve basınç dayanımının azalması yer alır. Bu nedenle, çelik cürufu-YFC çimento malzemesi iyi hacim stabilitesine sahip olur ve yaygın olarak ilgi çekicidir. Çelik cürufu ve YFC karışımı çimento sıvasında mükemmel dayanım özellikleri gösterir. Bu, çelik cürufu-yüksek fırın cürufu-çimento (ÇC-YFC-Ç) karışım sisteminin her hidrasyon döneminde yeterli dayanım geliştirme kapasitesine sahip olmasından kaynaklanır.

Erken hidrasyon döneminde, dayanım gelişimi çoğunlukla ince çimento hidrasyonundan kaynaklanır ve ayrıca sıkı paketlenme etkisi erken hidrasyon yaşında dayanımın geliştirilmesine yardımcı olur. Zamanla, dayanım gelişimi YFC ve iri çimento tanecikleri hidrasyonundan kaynaklanır ve iç yapı giderek yoğunlaşır. Daha geç bir hidrasyon yaşında, çimento ve YFC hidrasyon reaksiyonu giderek zayıflar ancak dayanım hala artar. Bu muhtemelen çelik cürufunun hala hidrate olmuş olması ve yoğun bir mikroyapı oluşturmuş olmasından kaynaklanır. Şekil 2.5'de farklı bileşenler arasındaki aşamalı hidrasyon, tüm aşamalarda basınç dayanımının gelişimine olumlu bir etki yapar. Ayrıca, ÇC ve YFC karışımı, ÇC-YFC-Ç katkısının gözenekliliğini etkili bir şekilde azaltabilir ve mikroskobik gözenek yapılarını yoğunlaştırabilir.



Şekil 2.5: Her hidrasyon çağında ÇC-YFC-Ç mukavemetini etkileyen faktörler

Mekanik özelliklerin yanı sıra, çelik çürüf ve YFC arasındaki sinerjistik etki hidrasyon ısısı yoluyla da yansıtılabilir (Zhao vd., 2023). Zhao vd. çalışması, çelik çürüf ve YFC'in hidrasyon exotermik eğrisinde üç ana exotermik pik olduğunu göstermiştir. İlk exotermik pik bir saat içinde meydana gelir. İkinci pik 4-10 saat arasında oluşur ve ÇC'nin hidrasyonundan kaynaklanır. ÇC oranı ne kadar yüksek olursa, ekzotermik pik o kadar büyük ve görünme zamanı da o kadar erken olur. Üçüncü pik ise YFC'in hidrasyonundan kaynaklanır ve 85 saat sonra oluşur. Her deney grubunun üçüncü pikini karşılaştırarak, çelik çürüf ve YFC oranları (2:3) ve (1:1) sırasıyla birinci ve ikinci sıradadır. Bu nedenle, YFC ve çelik çürüf arasında pozitif sinerjistik etkiler vardır. Daha sonra hidrasyon evresinde, YFC'in hidrasyonu ÇC'nin daha fazla hidrasyonunu teşvik eder ve C-S-H ve C-A-S-H gibi daha fazla hidrasyon ürünleri oluşur. YFC ve çelik çürüf arasında pozitif bir sinerjistik etki olsa da, çelik çürüfünün yüksek sertliği ve öğütülmesi zor olması gibi özellikleri, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarını engelleyebilir. Bu nedenle, diğer katı atıkların ÇC-YFC sistemi içine eklenmesi uygun bir yaklaşım olabilir.

2.2.4.4 Endüstriyel yan ürün alçıların sinerjik kullanımı ve YFC

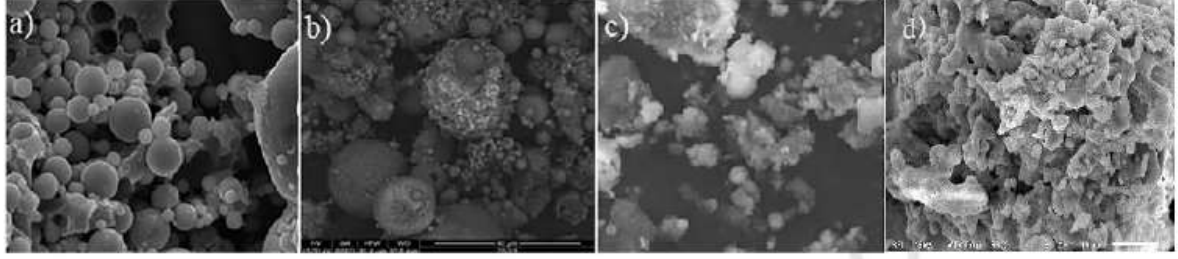
Endüstriyel yan ürünler arasında, kimyasal bileşimlerinde yüksek sülfat içeren desülfiteleşmiş kireçtaşı, desülfiteleşmiş kül, flor kireçtaşı, kırmızı kireçtaşı ve fosfogips yer almaktadır. Kireçtaşıdaki sülfat, C3A ve Ca(OH)₂ ile etrenjit reaksiyonu oluşturabilir. Bu etrenjit, çimentolu malzeme içinde büyür, gözenekleri doldurur, poroziteyi azaltır ve

malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir. Ancak, çimento malzemelerine kireçtaşı eklenme miktarı sınırlıdır çünkü sonraki hidrasyon aşamasında etrenjit oluşumuna devam edebilir, hacim genişlemesine ve hatta çatlaklara neden olabilir. Bu nedenle, kireçtaşı atığı genellikle diğer atıklarla birlikte kullanılır. Yukarıda bahsedildiği gibi, kireçtaşı içindeki sülfat, Ca^{2+} ve SO_4^{2-} sağlayarak YFC hidrasyonunu teşvik edebilir. Bunlar, SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} ile reaksiyona girerek C-S-H jel ve etrenjit oluştururlar. Bu reaksiyon, hacim genişlemesini azaltabilir ve betonun güvenilirliğini ve dayanıklılığını artırabilir. Xu vd., (2021) FG, DG ve DA'nın ÇC-YFC bağlayıcılara etkisini ve aktivasyon mekanizmalarını araştırmışlardır. Kireçtaşıdaki Ca^{2+} ve SO_4^{2-} , AlO_4^{5-} ile reaksiyona girerek etrenjit oluşturabilir. AlO_4^{5-} 'nin azalması ve çözeltinin alkaliliğinin artması, YFC'nin çözünürlüğünü hızlandırmıştır ve daha fazla silikat ve alüminat iyonu salmıştır. Ayrıca, SiO_4^{2-} ve Ca^{2+} 'nin varlığı da C-S-H jel oluşturabilir ve daha fazla hidrasyonu teşvik edebilir. Ayrıca, SO_4^{2-} ve çelik çürüfesi arasındaki reaksiyon da etrenjit oluşturabilir (Yongjuan Zhang, 2018).

Eğer kireçtaşına kükürt eklenirse, erken hidrasyon aşamasında etrenjit oluşur ve hidrasyon ürünleri C-S-H jelinde sıkıca gömülerek belirgin bir birleşik iğne benzeri bir yapı oluşturur (Xu, vd., 2021). Deney verilerine göre, ağırlıkça %5 kükürt giderilmiş kireçtaşı erken yaşta basınç dayanımını önemli ölçüde artırır (Jiang, vd., 2018). YFC ve kükürt giderilmiş kireçtaşı arasındaki sinerjik etki erken yaşta dayanım kaybını azaltabilir. Fosfogips, diğer sülfat katı atıklara kıyasla daha karmaşık bir bileşime sahiptir. Ağır metaller, florür ve radyoaktif elementlerin varlığı nedeniyle, fosfogipsin çimento bazlı malzemelerde kullanımı sınırlıdır (Min, vd., 2021). Kükürt giderilmiş kireçtaşıyla benzer şekilde, fosfogips de yüksek bir sülfat içeriğine sahiptir. Sülfat ile YFC arasındaki reaksiyon sırasında, zararlı ve radyoaktif elementler iki yol ile bağlanır (Gijbels, vd., 2018). İlk yol fiziksel kapsüllemeye karşılık gelir ve bazı zararlı elementler hidrasyon ürünleriyle kaplanabilir. İkincisi ise kimyasal sertleşmedir; ağır metal iyonları Si-Al sisteminde sertleştirilebilir. Yük dengesi etkisi nedeniyle, ağır metal iyonları Al veya Si'nin yerini alabilir ve yeni bir kimyasal bağ oluşturabilir (Zhang, vd., 2020). Yukarıda belirtildiği gibi, kireçtaşıdaki sülfat erken yaşta basınç dayanımını artırabilir, ancak daha sonraki yaşlarda basınç dayanımına katkısı zayıftır.

2.2.4.5 Uçucu kül ve YFC'nin sinerjik kullanımı

UK, kömür yakımından kaynaklanan, elektrostatik çöktürücüler tarafından toplanan daha hafif parçacıklardır. ÖKAÜ ise kömürün alt kısmından elde edilen daha ağır kül parçacıklarıdır. Farklı yanma yöntemlerine göre, UK, ÖKÜK ve dolaşım yataklı yakıt yanması sonucu ayrılabilir. Normal UK silisyum içerirken, kalsiyum içeren YKUK, kömür tipine bağlı olarak değişiklik gösterir. Farklı UK tiplerinin mikroskopik morfolojileri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: (a) UK, (b) PKUK, (c) YUK ve (d) YKUK'nin mikro yapısı (Cheah, vd., 2022, Giergiczny,2019)

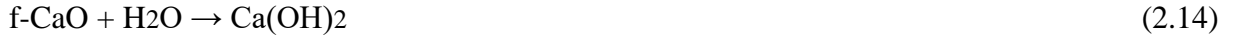
UK, çimento ve beton endüstrilerinde en yaygın kullanılan katkı malzemelerinden biridir. Şekil 2.6'da 'da görüldüğü gibi normal UK, küresel bir mikroyapıya sahiptir ve YFC ile olan sinerjistik etkisi parçacık dolgulama etkisidir. Mikroskopik gözenekleri etkili bir şekilde doldurabilir, gözenekliliği azaltabilir ve akıcılığı arttırabilir. Çimentodaki UK miktarı arttıkça, harcın işlenebilirliği artar ancak basınç dayanımı azalır. Ancak YFC çimentoya eklendiğinde durum değişir. YFC miktarı arttıkça, harcın işlenebilirliği azalır ve basınç dayanımı çok fazla değişmez. Ancak uygun bir oranda YFC ile karıştırıldığında, karışık harç YFC eklenmesinden kaynaklanan akıcılık azalmasını önleyebilir. Gholampour ve Ozbakkaloglu, (2017), çimentonun %50'sini YFC: UK 1:1 karışımı ile değiştirerek, basınç dayanımının saf çimentonunkine yakın olduğunu belirtmiştir.

Düşük kalsiyumlu UK ile karşılaştırıldığında, YKUK mineral bileşimi oldukça karmaşıktır ve çeşitli çimento bileşenleri içerir, özellikle C3S, C2S ve C3A gibi. Ayrıca, YKUK yüksek miktarda serbest kireç içerir (Papadakis, 1999; Vagelis, vd., 2000). YKUK, uygun oranlarda YFC ile karıştırıldığında ve çimento olarak kullanıldığında, dayanım artışına neden olabilir. Bu artış, çimento bileşenlerinin hidrasyonundan kaynaklanabilir. Ayrıca, YKUK 'daki kireç, alkaliniteği artırır ve YFC'nin hidrasyonunu teşvik ederek ekstra bir C-S-H jel oluşumuna neden olabilir. Son olarak, küresel partiküller mikroskopik gözenekleri etkili bir şekilde doldurarak daha yoğun ve daha güçlü bir mikroyapı oluşturabilir (Shubbar, vd., 2018).

Kalkersi uçucu külün kullanımı YKUK 'ya kıyasla daha fazla kısıtlamaya tabidir, çünkü KUK 'nın bileşimi daha karmaşıktır ve parçacıklar düzensiz şekillidir. Özellikle dikkat edilmesi gereken nokta, KUK 'daki SO₃ içeriğinin çimento içinde 10 kat, YFC içinde ise 50 kat daha yüksek olduğudur (Chi, 2016). KUK katkısı çimento içinde %20'yi aştığında, çimentonun hacim genişlemesine neden olabilir. Ayrıca, bazı çimento özellikleri, örneğin dona karşı dayanıklılık ve korozyona karşı dayanıklılık, kötüleşebilir (Sheng, vd., 2007).

Şu anda, KUK 'nın YFC için bir aktivatör olarak kullanımıyla ilgili sadece birkaç çalışma mevcuttur. KUK'daki f-CaO ve SO₃, genellikle çimento uygulamasını sınırlarken, bu bileşikler YFC ile çimentolu malzemelerde iyi bir şekilde etkinleştirilebilir (Chi, 2016). Zhang vd., (2022), CFA'nın YFC ile aktivasyon mekanizmasını araştırdılar ve f-CaO ve SO₃'ün YFC'deki aktif silika-alümina tarafından silisifiye ve kalsifiye edilebileceğini ve

aşağıdaki reaksiyonlar aracılığıyla hidrasyon ürünleri (örneğin etrenjit ve C-S-H jel) oluşturabileceğini buldular. Ana sinerjik mekanizma, alkaliniteyi artırmak ve sülfat sağlamaktır.



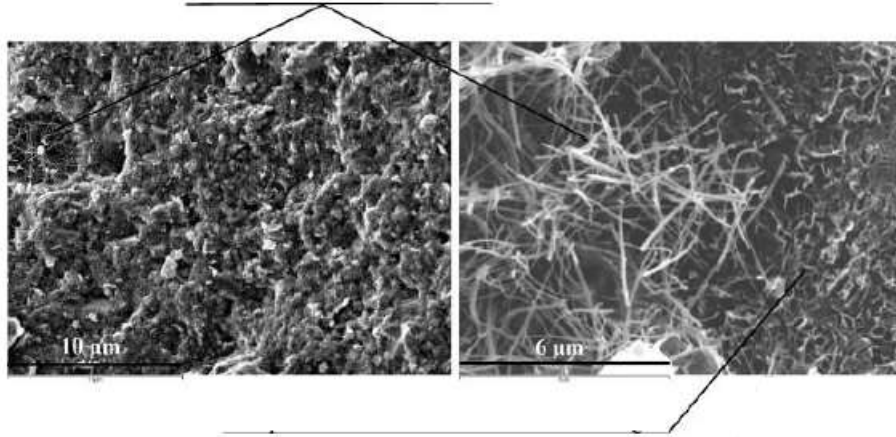
Özetle, tüm UK türleri ve YFC, YFC'in hidrasyon reaksiyonları üzerinde iyi sinerjik etkilere sahiptir. Bu nedenle, çimento ve beton endüstrisinde YFC'in yerine kısmen UK kullanmak mümkündür.

2.2.4.6 Çoklu katı atıklar ve YFC arasındaki sinerjik etki

Yukarıda belirtildiği gibi, YFC ve çeşitli atık türleri (özellikle kırmızı çamur, ÇC, alçı ve UK) arasında önemli sinerjik etkiler vardır. Ancak, YFC ve bir tür atığın kullanımı hala sınırlıdır. Ana sınır, çimento malzemesindeki atık dozajıdır. Dozaj çok yüksek olmamalıdır, aksi takdirde fiziksel özellikler önemli ölçüde azalacaktır. Bu nedenle, birden fazla katı atığın kullanımı uygun bir yöntem olabilir. Genellikle, çimento malzemelerindeki bileşenler birbirleriyle olumlu bir sinerjik etkiye sahip olduğunda, üçlü veya daha fazla sistem daha iyi performans göstermiştir (Hao vd., 2022; Zhang vd., 2011, 2022).

ÇC, kırmızı çamur ve YFC'den oluşan çimento malzemelerinin üçlü sistemi, çimentonun basınç dayanımını artırmak için faydalıdır. Birden fazla atık arasındaki sinerjik etki nedeniyle, 42.5 R çimentosunun dayanımı 52.5 R seviyesine yükselmiştir. Bağlayıcıdaki çelik cürufu dozu, yalnızca çimentoda kullanılan dozajdan daha yüksek olan %30'dur. Yukarıdaki üçlü bağlayıcıya ekstra alçı da eklenmiştir. Jipsin SO_4^{2-} , kırmızı çamurdaki AlO_4^- ve YFC'deki SiO_4^{2-} 'nin çözünmesini hızlandırarak daha fazla hidrasyon ürünü (örneğin etrenjit ve C-S-H jel) oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Zhang vd., 2020). Zhang vd., (2011), çimento yerine %61 oranında kırmızı çamur, YFC, UK ve alçı kullanarak çimento yerine geçen bir karışım geliştirmişlerdir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, karışım düşük gözenekli bir matris yapısı oluşturur ve çeşitli şekil ve boyutlardaki parçalar çimento matrisine iyi bağlanır. Gözenekliliğin azalması ve hidrasyon ürünlerinin (örneğin etrenjit ve C-S-H jel) artması nedeniyle basınç dayanımı artmıştır.

iğne şeklindeki etrenjit kristalleri



ağsı C-S-H jelinin amorf reaksiyon kenarları

Şekil 2.7: Düşük gözenekliliğe (solda) ve retiküle C-S-H jeline (sağda) sahip sıkıştırılmış yapıların SEM görüntüsü (Zhang, vd., 2011)

2.2.5 Kompozit yüksek fırın cürufunun pazar analizi

Çimento ve yapı endüstrisinden elde edilen verilerle birlikte kompozit YFC'nin ekonomik ve çevresel faydaları tartışılmaktadır. Bu, ham maddelerin %50'den fazlasının endüstriyel katı atıklar olduğu gerçeğiyle açıklanabilir.

Dünya genelinde, 1000 kg demir döküldüğünde yaklaşık 300 kg YFC atığı üretilmektedir. Küresel YFC ve çimento üretimi sırasıyla yaklaşık 510 milyon ton ve 4200 milyon tondur. Genellikle, YFC, Portland çimentosunun %30-%50'sini yerine koyabilir, bu nedenle YFC'nin arzı, çimento endüstrisinin talebini karşılamaktan çok uzaktır. Bu nedenle, çimento endüstrisi teorik olarak hala 500-700 milyon ton YFC'ye ihtiyaç duyuyor.

Kompozit YFC üretimi sadece ekonomik faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevreyi de önemli ölçüde korur. Katı atık birikimini azaltabilir ve hammaddelerdeki yüksek katı atık yüzdesi nedeniyle çimento endüstrisi ile metalürjik endüstriler arasında daha fazla sinerji sağlayabilir. Ayrıca, katı atık için bir çapraz endüstriyel kullanım ağı oluşturabilir. Daha da önemlisi, sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Çimento ve yapı endüstrisi, yüksek miktarda CO₂ emisyonuna neden olduğundan, bu önemli bir çevresel faydadır. İşletmelerin üretim kapasitesi, ürettikleri katı atık tarafından sınırlıdır. Katı atıkların kapsamlı olarak kullanılması, işletmenin daha fazla ürün üretmesine ve daha fazla gelir elde etmesine olanak tanır. Bu şekilde, işletme daha ileri bir gelişme sağlayabilir.

2.3. Perlit

Perlit, perlitin hidrasyonu ile oluşan camımsı bir volkanik kayadır ve genellikle obsidyenin hidrasyonu sonucu oluşur. Yüksek viskoziteli magmanın ekstrüzyonuyla sınırlı alanlarda blok tipi lav kubbeleri şeklinde doğal olarak oluşur. Perlit yatakları, Tersiyer yaş veya daha

genç riyolitik bileşimli yataklarla sınırlıdır. Riyolitik camlar kararlı değildir ve yaşlandıkça kuvars ve feldspat mikrokristalin agregalara dönüşür ve zeolitler ve diğer alüminosilikat minerallerine dönüşür. Bu nedenle, perlitin korunması, Tersiyer yaşından daha eski kayalarda nadiren bulunur.

"Perlstein" kelimesinden türetilen perlit adı, "birçok konsantrik çatlaklara sahip belirli camlı kayaları (hyaloliparitler, hyalo-riyolitler)" belirtmek için kullanılır. "Perl", kırılmış parçaların inciye benzerliği veya yüzeylerin inci parlaklığına benzerliğine atıfta bulunur. Petrolojik olarak, "perlite" terimi, soğuma gerilimi sonucu gözle görülebilen veya sadece mikroskop altında gözlemlenebilen bir konsantrik veya soğan yapısında kırılma olan volkanik camlara atıfta bulunur. Bu kırılma yapısı ayrıca "perlitik" olarak da bilinir.

Perlit, diğer doğal su taşıyan camlardan (ağırlıkça %2-5 toplam su içeriği, pırıltılı bir parlaklık ve soğuma çatlaklarının soğan kabuğu şeklinde olmasıyla ayrılır. Ancak, terim, nadiren ya da sadece mikroskop altında gözlemlenebilen perlitik çatlaklara sahip olmayan daha az yoğun perlit dokularını da içerecek şekilde genişletilmelidir. Perlitin dokuları sıklıkla yoğun ve klasik olarak çatlaklı olan varyanttan, pırıltılı bir parlaklığa ya da makroskopik perlitik çatlama sahip olmayabilen kabarcıklı ve pomza benzeri varyetelere kadar değişebilir. "Perlit" terimi, hızlı bir şekilde genişleyen herhangi bir doğal cam türüne uygulanmıştır, ancak bu özellik perlitik yapıya sahip olmayan bazı camlı kayalarda ve riyolit veya obsidiyenin alterasyon ürünü olan bazı kayalarda da bulunabilir.

Perlit, 760°C ile 1100°C arasında ısıtıldığında su buharı haline dönüşerek orijinal hacminin 4-20 katı genişler. Bu nedenle, "genleştirilmiş perlit" (GP) olarak adlandırılır. Şekil 2.8, perlitin genleştirilmemiş ve genleştirilmiş formlarını göstermektedir.



Şekil 2.8: (a) Genleştirilmemiş perlit (b) Genleştirilmiş perlit

GP, düşük termal iletkenliğe, yüksek ses emilimine, yüksek ısı direncine, kimyasal inertliğe, fiziksel dayanıklılığa ve su tutma yeteneğine sahiptir. Perlitin yarısından fazlası, inşaat sektöründe yalıtım levhaları, akustik tavan panoları, sıva ve betonlarda agrega olarak kullanılır. Ayrıca, tarım sektöründe ve diğer uygulamalarda, örneğin farmasötik ve gıda endüstrisinde filtreleme gibi, çeşitli işlemler ve malzemelerde dolgu maddesi olarak da

kullanılır. Perlitin özellikle endüstriyel ve inşaat uygulamalarındaki kullanımına dair birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, perlitin özellikleri ve uygulamalarına dair az sayıda makale yayınlanmıştır. Singh (1991), perlitin çok yönlü bir yapı malzemesi olarak kullanımına dair bir derleme yapmıştır. Barker ve Santini (2006), dünya genelindeki perlit yatakları ve faaliyetleri hakkında bir genel bakış sunmuştur.

2.3.1 Genişleme süreci

Genellikle, perlitlenme işlemi, bir fırında hızlı ısıtma ve ardından hızlı soğutma sürecini içerir. Kayağın, ısıl işlemde önce ne kadar küçük parçalara ayrılacağı, perlitin bileşimine (örneğin, su içeriğine), fırın tasarımına ve genişlemiş perlitin gerektiği son kullanıma bağlıdır. Genellikle, 8 mesh (2,380 mm) üzerinden geçen ve 30 mesh (0,595 mm) üzerinde tutulan perlit parçacıkları beton agregası olarak kullanılmak üzere uygundur. 14 mesh (1,410 mm) üzerinden geçen ve 50 mesh (0,297 mm) üzerinde tutulan perlit parçacıkları ise sıva agregası olarak kullanılmak üzere uygundur. 30 mesh (0,595 mm) altındaki ince partiküller ise en hafif genişletilmiş ürünlerde kullanılır. Tipik bir fırın beslemesi, çapları 0,254 ila 2,54 mm arasında değişen perlit tanelerini içerir. 25 µm'den daha küçük taneler, genişletilmiş üründe çok ince toz parçacıkları oluşturma eğilimleri nedeniyle geleneksel olarak elenir.

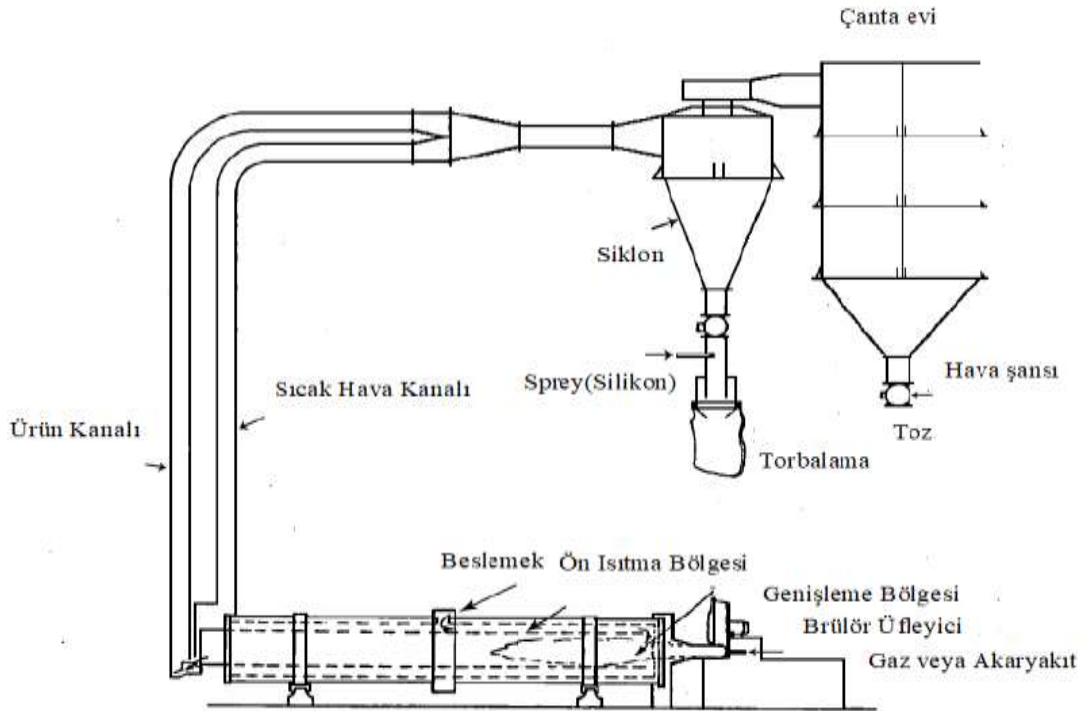
Perlitin yumuşama noktasına kadar ısıtılma aşamasında, birleşik su buharlaşarak basınç oluşturur ve perlitin hacminin %4 ila %20'si oranında genişlemesine neden olur. Bu genişleme, perlitin hacim yoğunluğunda önemli bir azalmaya neden olur. Isıtma işlemi, 760°C ile 1100°C arasındaki değişen sıcaklıklarda bir ila üç dakika sürebilir. Isıtma işlemi, yatay döner genişletici veya dikey sabit genişletici olarak her ikisi de aynı prensibe dayandığı için her iki tür genişleticide de gerçekleştirilebilir. Şekil 2.9 ve 2.10, sırasıyla yatay ve dikey genişleticilerin şematiklerini göstermektedir.

Perlit genişletme işlemi için ısıtma hızı optimize edilebilir. Eğer perlit granülleri çok yavaş ısıtılırsa, birçok 'patlama etkisi' olmadan gözeneklerden birleşik su çıkar ve hafif gözenekli ama nispeten yoğun bir ürün oluşur. Ancak, ısıtma hızı çok yüksek olursa, suyun genişlemesi o kadar şiddetli olabilir ki perlit tanecikleri kırılır ve birçok toz oluşur (Saunders, 1979). Perlit genişlemesi için optimum sıcaklık, kimyasal bileşimine bağlı olabilir. Camın bileşimindeki farklılıklar, yumuşama noktasını, genişleme tipini ve derecesini, kabarcık boyutunu ve aralarındaki duvar kalınlığını, ürünün porozitesini etkiler (Bates, 1960). Ayrıca, perlitteki su içeriği optimizasyonu etkileyen bir diğer faktördür. Fazla birleşik su içeren perlitin genişlemesi muhtemelen kırılacaktır, ancak çok az su içeren perlit daha yüksek yoğunluklu ürünler üretebilir (Kadey, 1983). Perlitteki tipik bir %3.2 ila %3.7 birleşik su değeri çoğu koşulda en iyi çalışan değer olarak görüldüğünü belirtmişlerdir (Barker ve Santini, 2007).

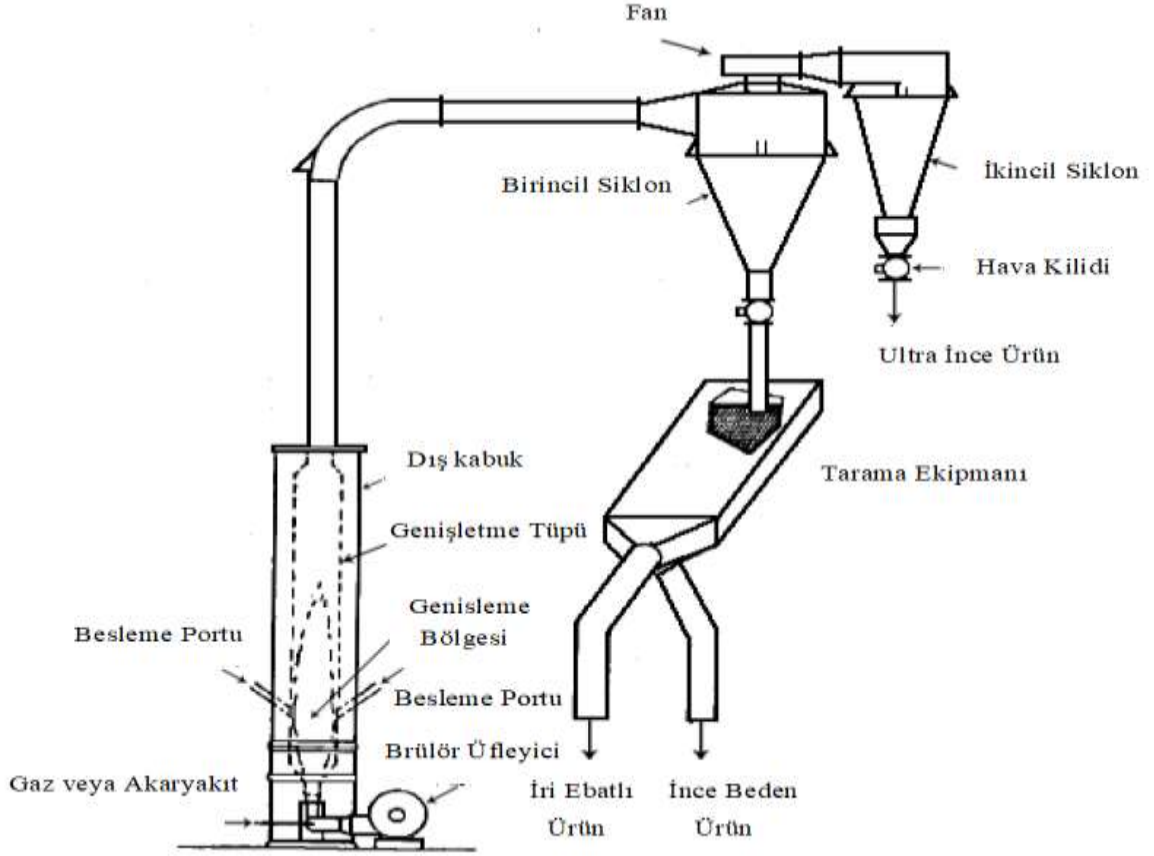
King vd., (1948), perlitteki suyun %1.2'den fazlasının gevşek olduğunu ve dolayısıyla kolayca çıkarılabileceğini bildirmiştir. Ancak, dehidrasyon ilerledikçe, kalıntı suyu (%0.5'in altında) daha sağlam bir şekilde tutulur ve bu, perlitin ısınma sırasında genişlemesinde etkili olan kısımdır. Genellikle başlangıç termal şokunun etkisini azaltmak ve kırık malzeme miktarını azaltmak için bazı ön ısıtma yöntemleri kullanılır. Ayrıca,

gevşek olarak tutulan suyun bir kısmı çıkarılarak daha büyük parçaların yumuşama noktalarına yaklaştırılmasıyla, genişletici için harcanan süre azaltılarak yakıt verimliliği artırılabilir (Pettifer, 1981). Aynı zamanda, son ürünün yoğunluğunu düşürerek ürünün yalıtım kabiliyetini artırabilir. Özellikle büyük taneli sınıflar için, ön ısıtmanın önemi büyüktür çünkü bu sınıflar belirli bir sürede ısı transferi için daha az yüzey alanı sunarken, orta ve ince sınıflar için genellikle ön ısıtılma olmayacağını belirtmiştir (Jackson, 1986). Fırın koşullarının ve ön ısıtmanın ayarlanmasıyla son ürün özelliklerinde bir esneklik elde etmek mümkün olsa da, tüm parçacıkların aynı şekilde genişlemediğinin unutulmamasını söylemiştir (Barker, 2006). Son ürünün özellikleri, granül boyutu, granül su içeriği ve granül bileşimi ile birlikte fırın tasarımı, işletmesi ve ısıtma hızına bağlı olduğunu belirtmiştir (Saunders, 1979).

GP soğutulduğunda, genişletilmemiş parçacıklar ve ince taneler ayırmak için hava sınıflandırması yapılır. GP, amaçlanan kullanıma bağlı olarak daha fazla boyutlandırılabilir, yüzey işlemine tabi tutulabilir veya öğütülebilir. Örneğin, bazı genişletilmiş perlitler, özellikle döner ön-kat filtrasyonda bir filtre yardımcısı olarak kullanılmak üzere -100 mesh (0,15 mm) öğütülmüştür (Ciullo, 1996). Polimerik filmler için anti-blok dolgu maddesi veya polimerler için güçlendirici dolgu maddesi olarak kullanılmak üzere öğütme ile mikronize edilmiş perlit taneleri de (-2 µm) üretilmiştir. (Wang, 2009).



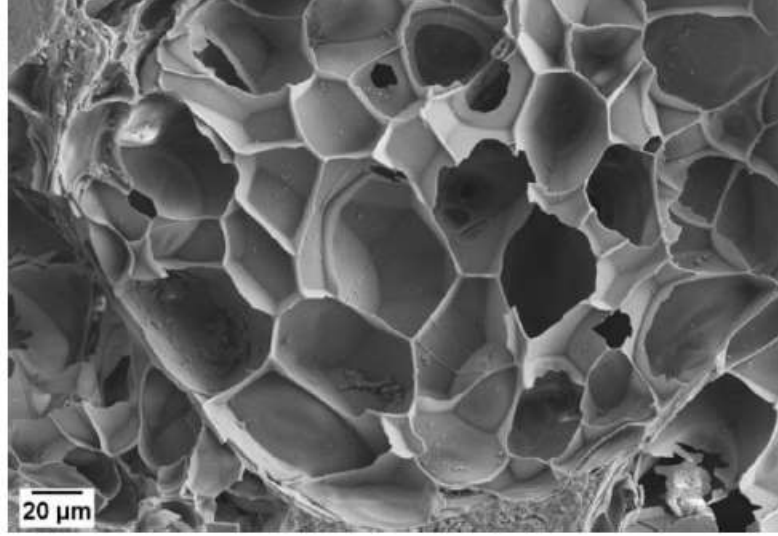
Şekil 2.9: Yatay genişletici ve taşıma sistemi (Jackson, 1986)



Şekil 2.10: Dikey genişletici ve taşıma sistemi (Jackson, 1986)

2.3.2 Perlitin fiziksel özellikleri

Perlit, klasik (soğan kabuğu benzeri), taneli ve pomice olmak üzere farklı dokulara sahip olabilir (Barker, 2006). Klasik veya soğan kabuğu benzeri perlit, iyi gelişmiş konsantrik çatlakları, inci rengi-reçine rengi parlaklığı ve gri-mavi-siyah renkleri ile karakterizedir. Taneli perlit ise şekerimsi veya sakkaroidal görünümüne sahiptir, mikroveziküler ve yüksek kırılma gücüne sahiptir. Renkleri beyazdan griye kadar değişebilir. Taneli perlit, klasik perlitlerden daha hafif ama pomice perlitlerden daha yoğun bir yapıdadır. Pomice şeklindeki perlit ise son derece hafif, beyazdan açık griye kadar renk tonları olan, köpüklü ve genellikle kırılmandır. Tüm perlit türleri madenlerden çıkarılır, ancak en yaygın ticari olarak kullanılan tür taneli perlit formu olduğunu belirtmişlerdir (Austin ve Barker, 1998). Tane şekli genişleme oranını etkiler. Pomice şeklindeki perlit, taneli perlitlerden daha yüksek bir genişleme oranına sahipken, klasik (soğan kabuğu benzeri) perlitlerden daha düşük bir genişleme oranına sahiptir. Taneli perlit, su buharının kolayca çıkmasına izin veren iyi dağıtılmış bir mikroveziküler dokuya sahiptir ve bu nedenle sadece küçük bir derecede perlit genişlemesi meydana gelir, pomice ve klasik perlitlerden çok daha az. Ancak, klasik perlitte su buharı ardışık soğan kabuğu benzeri katmanlar arasından çıkarken zorlanır. Bu nedenle, ani buharlaşma artan basınca neden olur ve tahılın patlamasına ve büyük ölçüde genişlemesine neden olur (Rouliia vd., 2006). 760°C'nin üzerinde ısıtıldığında perlitin dönüştüğü hücreli iç yapılı hafif ve gözenekli malzeme, Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Genleştirilmiş perlit taneciklerinde dahili olarak oluşan hücresel yapı

Perlit, ham haliyle 1,04 ila 1,2 g/cm³ arasında bir hacme sahipken, genişleştirildiğinde tipik olarak 0,032 ila 0,4 g/cm³ arasında bir hacime sahip olur. Ancak, gerçek yoğunluğu beklenenden çok fazla değişmeyeceğini belirtmişlerdir (Doğan ve Alkan, 2004). Genleştirilmiş perlit, yüzey özellikleri açısından çok gözenekli (hacimce %85-95 (Taherishargh vd.,2014)) köpüksü yapıdan düşük gözenekliliğe sahip cam parlaklığına kadar değişebilen bir yapıya sahip olduğunu söylemiştir (Otis, 1960). Gözeneklilik, bahçecilik kullanımlarında ve peyzaj tasarımlarında drenaj, havalandırma ve nem ve gübreleri tutma açısından avantajlı bir özellik olduğunu belirtmişlerdir (Afshari vd., 2011). Ancak, gözeneklerin suyla dolması, termal yalıtım uygulamalarında istenmeyen su emilimine neden olabilir, çünkü ısı iletkenliği artmıştır (Topçu ve Işıkdag, 2007). Genleştirme süreci ayrıca perlit parlak beyaz bir renge dönüştürür ve bu, hücresel yapıların yansıtıcılığından kaynaklanır. Parlak beyaz renk, özellikle görünür yüzey kaplamalarında yararlıdır. Renk, dolgu uygulamalarında da önemli bir konudur, özellikle ürünün renginin önemli olduğunu belirtmişlerdir (Barker ve Santini, 2006). Genleştirilmiş perlitin tipik fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.3: Genleştirilmiş perlitin tipik fiziksel özellikleri (Topçu ve Işıkdag, 2007; Singh ve Garg, 1991)

Tipik Fiziksel Özellikler

Renk	Beyaz
GP parlaklığı %	78
Kırılma indisi	1,5
Serbest Nem, Maksimum	%0.5
pH (su bulamacının)	6.5 - 8.0
Spesifik yer çekimi	2.2 - 2.4
Islak yoğunluk (kg/m ³)	103
Toplu Yoğunluk (Gevşek)	0.032 - 0.400 g/cm ³

Ağ Boyutu Mevcut	4 - 8 gözenekli ve daha ince
Yumuşama noktası	871 - 1093°C
Füzyon Noktası	1260 - 1343°C
Ağırlık birimi	2.2 - 2.4 g/cm ³
Özısı	0.20 kcal/kg°C
75°F'de (24°C) Termal İletkenlik	0.04 - 0.06 W/m·K
Çözünürlük	- Sıcak konsantre alkali ve HF'de çözünür - 1N NaOH içinde orta derecede çözünür (<%10) - Mineral asitlerde az çözünür (<%3) (1K) - Suda çok az çözünür (<%1) veya zayıf asitler

2.3.3 Kimyasal bileşim

Perlit, kimyasal olarak inert ve yaklaşık 7 pH değerine sahip bir mineraldir. Ana bileşenleri silika, alümina ve az miktarda sodyum, potasyum, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi metal oksitleridir. Farklı ülkelerden perlit cevherlerinin bileşimi Çizelge 2.3'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, farklı kaynaklardan perlit bileşimi önemli ölçüde değişebilir, ancak yüksek silika (%65'ten fazla) ve alümina içeriği (%11-18) ile karakterize edilir ve yaklaşık %7-8 alkalik içeriğe sahip olduğunu bildirmişlerdir (Burriesci vd., 1985).

Burriesci vd., (1985), perlit cevherinde karbonat izine rastlamadıklarını ve başka bir alümina silikat olan tuf (Sersale vd.,1984) ile ağırlık kaybı eğrileri arasındaki karşılaştırmaya değinmişlerdir. Karbonatın ayrıştığı 700-900°C aralığında eğrinin doğrusallığı ve düzlüğünü göz önünde bulundurarak, karbonat izine rastlanmamıştır. Ancak perlit ağırlık kaybı eğrisine bakıldığında, düzlük iyi belirlenememiştir. Her üç noktada da sadece üç nokta kullanılmıştır, bu da her üç noktalı her doğrunun doğrusal görüldüğünü göstermiştir (Burriesci vd., 1985).

Perlit cevherlerinde ayrıca genellikle %2'den az olan bazı diğer elementler de tespit edilmiştir. Bu elementler genellikle arsenik, bor, berilyum, baryum, klor, krom, bakır, galyum, kurşun, lantan, mangan, molibden, nikel, niobyum, neodimyum, kükürt, titanyum, toriyum, vanadyum, yttrium, zirkonyum ve çinko gibi elementler olduğunu belirtmişlerdir (Johnstone, 1961; Gunning, 1994; Jackson, 1986; Saunders, 1979; Kadey 1983). Ayrıca, nadir toprak elementlerinin (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu) iz miktarları, Trachilas (Yunanistan) (Koukouzas, 1997), Doğu Rodop (Bulgaristan) (Yanev ve Yordanov, 1991), Nathrop (Kolorado) ve No Agua (New Mexico) (Zielinski ve Millard, 1977) perlit yataklarının kimyasal bileşim analizlerinde tespit edilmiştir.

Çizelge 2.4: Perlitin kimyasal bileşimi (Yüzde) (Doğan ve Alkan, 2003)

Bileşenler	Yeni Meksika (Gunning, 1994)	Yunanistan (Austin ve Barker, 1998)	Çin (Rouliia vd., 1997)	Türkiye (Doğan ve Alkan, 2004)	İran (Cheremisino ff)	Tayland (Afshari vd., 2011)
SiO ₂	74,10	76,10	76,89	68,40	72,32	75,20
Al ₂ O ₃	13,30	12,16	10,51	15,11	12,62	12,75
Na ₂ O	3,20	3,62	0,80	1,62	2,96	2,85
K ₂ O	4,60	3,03	8,25	4,05	5,02	5,12
CaO	0,60	1,21	0,12	1,72	0,66	0,38
Fe ₂ O ₃	0,50	1,19	2,48	2,76	0,67	0,99
MgO	0,10	0,27	0,06	0,42	0,21	<0,10
TiO ₂	0,05	0,14	0,07	-	-	0,14
MnO	-	0,05	0,04	-	0,66	0,05
P ₂ O ₅	-	0,03	0,03	-	0,13	<0,05
SO ₃	0,10	-	-	-	-	-
H ₂ O	-	-	0,31	4,92	-	0,43
LOI ^a	-	2,19	0,64	-	3,75	1,50

a. LOI, ateşleme kaybı.

Perlitin kimyasal bileşimi ve fiziko-kimyasal özellikleri obsidyen ve pomza ile benzerdir. Ancak perlitin daha yüksek bir su içeriği var olduğunu söylemişlerdir (genellikle yaklaşık %3-4) (Burriesci vd., 1985). Su, genişleşme sürecinde tanelerin buharlaşması sırasında genişlemesine neden olması yanı sıra, tanelerin viskozitesini azaltarak önemli bir rol oynar (Rouliia, 2006). Perlitteki suyun iki şekilde var olduğu bildirilmiştir; moleküler olarak çözülmüş su ve hidroksil grupları. Bu iki su türünün oranı perlitte değişken olduğunu belirtmiştir (Moavenzadeh, 1990). King vd., (1948), perlitteki 0-298 K arasındaki molar entropi artışını, MgCl₂.H₂O gibi kristal suyu içeren birkaç madde ve Mg(OH)₂ gibi hidroksil grupları olarak su içeren birkaç madde ile karşılaştırmışlardır. Perlitteki molar entropi artışı, kristal suyu içeren bileşiklerle karşılaştırılabilir niteliktedir. Bununla birlikte, perlitteki suyun kristal suyu gibi tutulduğuna dair bir sonuca varmamışlardır, çünkü perlitteki büyük bir kısmın hidroksil grupları olarak bağlandığını söylemek imkânsızdır. Daha sonra, Stolper, (1982), toplam su içeriği düşük (<%2) olduğunda hidroksil gruplarının konsantrasyonunun hızla arttığını, ancak toplam su içeriği %3'ün üzerinde olduğunda konsantrasyonun sabit kaldığını veya azaldığını bulmuştur. Öte yandan, moleküler suyun konsantrasyonu düşük toplam su içeriğinde yavaşça artarken, toplam su içeriği %3'ün üzerinde olan camlarda daha hızlı arttığı bulunmuştur. Ayrıca, toplam su içeriği %4 olan su içeren camlarda, çözülmüş su iki tür su arasında eşit olarak bölünürken, toplam su içeriği >%4 olan camlarda daha fazla su moleküler su olarak çözülmüştür.

Saisuttichai ve Manning (2007), Tayland'ın Lopburi şehrinin kuzeydoğusunda bulunan perlitleşmiş cevherleri incelemiştir ve %3.40 su içeren örnekler üzerinde Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi yapmıştır. Sonuçlar, daha yüksek moleküler su miktarını göstermiştir ve Stolper'in bulgularıyla uyumlu olmuştur. Roulia vd., (2006), Yunanistan'ın Trachilas bölgesinden elde edilen %3.48 su içeren perlitleşmiş cevher taneciklerini de benzer şekilde incelemiştir ve sonuçlar yine Stolper'in bulgularıyla uyumlu olmuştur. Bu nedenle, perlitleşmiş cevherlerdeki hidroksil ve moleküler grupların oranı, toplam su miktarına bağlı olarak değişir ve bazı kaynakların (örneğin (Bates, 1960)) genellikle toplam su miktarını dikkate almadan moleküler sudan daha büyük bir hidroksil grubu oranı varsaymasının doğru olmadığını söylemiştir.

Perlitik ağın doğası üzerine yapılan çalışmalar, perlitin çoğunlukla amorf yapısına ve küçük miktarda kristalin inklüzyonlara (örneğin kuvars, feldispat ve biyotit) sahip olduğunu göstermiştir. Herskovitch ve Lin, (1996), Milos Adası'ndan elde edilen ham perlitleri incelemiştir ve %89,4 hacim oranında amorf faz ve %10,6 hacim oranında kristalin fazlar (feldspatlar, biyotit, kuvars, manyetit ve klorit) olduğunu bildirmişlerdir. Ham perlitteki kristallerin varlığı, kökeniyle ilgilidir.

Kristalin silika (örneğin kuvars, kristobalit ve tridimit), küçük miktarlarda olsa da, üretim ve pazarlama sırasında endişe kaynağıdır. Kristalin silika, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı tarafından sınıflandırılmıştır ve solunduğunda insanlar için 2A sınıfı (olası bir kanserojen) olarak kabul edilir, ancak yutulduğunda veya temas edildiğinde değil. Ancak, çoğu ticari perlit yataklarında kristalin silika miktarı çok düşüktür (<%1-3 ağırlık). Bu, işleme ve kullanım sırasında daha da düşürülebilir, örneğin son üründe seyreltilebilir. Ham perlit, amorf ve kristalin fazları içermesine rağmen, geliştirilmiş perlit açıkça amorf olarak tespit edilmiştir. Barth-Wirsching vd., (1993) ve Chakir vd., (2002) tarafından yapılan X-ışını kırınım analizi, geliştirilmiş perlitin amorf olduğunu göstermiştir. Roulia vd., (2006) ayrıca, hızlı termal işlemin etkisiyle perlitin genişlemesinin yalnızca ham perlitin amorf fazında gerçekleştiğini ve kristallerin genişlemediğini, genişlemeyen atık ürün olarak reddildiğini bulmuşlardır. GP'nin kimyasal analizi, ham perlit ile benzer bir bileşime sahip olduğunu ancak daha az bağlı su miktarına sahip olduğunu göstermiştir. Perlitin genişlemesi, hidroksil grup içeriğinde önemli bir azalmaya ve daha küçük bir moleküler su azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Saisuttichai ve Manning, 2007).

Ayrıca, perlitten florin kaybedilerek, muhtemelen HF olarak, suya giderek daha fazla kullanılabilir hale gelir. Florinin bitkilere zararlı etkileri iyi bilinmektedir (Fornasiero, 2001), bu nedenle bu tür perlitlerin hortikültür uygulamalarında kullanımı sınırlandırılabilirliğini söylemişlerdir (Saisuttichai ve Manning, 2007). Ayrıca, genişleme sonrasında, Ca (kalsiyum) ve Mg (magnezyum) kullanılabilirliği azalırken, özellikle yüksek potasyumlu perlitik riolitlerde çıkarılabilir K (potasyum) artmıştır. Ancak, K'nin su çözünürlüğündeki artış, hortikültür uygulamalarında yararlı olabileceğini bildirmişlerdir (örneğin, potaşın olası yavaş salınım kaynağı olarak) (Saisuttichai ve Manning, 2007).

2.3.4 Uygulamalar

Perlitin düşük yoğunluğu, nispeten düşük fiyatı ve iyi yalıtım özellikleri birçok ticari uygulamanın geliştirilmesine neden olmuştur. Bu uygulamalar üç genel kategoriye ayrılabilir: inşaat uygulamaları, bahçecilik uygulamaları ve endüstriyel uygulamalar.

2.3.4.1 İnşaat uygulamaları

Perlitin düşük yoğunluğu, yüksek ısı yalıtım değeri, olağanüstü yangın direnci ve iyi ses emici özellikleri, öncelikle şekillendirilmiş ürünler, beton agregası, duvar örgüsü ve boşluk dolgu yalıtımı ve sıva agregası olarak bir dizi inşaat uygulamasına sahip olmasını sağlar. Perlitin inşaat kullanımları, ana pazarlarda toplam tüketimin %60-70'ini oluşturur. ABD'de, şekillendirilmiş ürünlerin imalatı, toplam perlit kullanımının yaklaşık %53'ünü oluşturur. Ancak, Avrupa'da inşaat yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle, perlitin şekillendirilmiş ürünlerde bu kadar büyük bir talep görmek mümkün olmayabilir. ABD'de çoğu ev ahşap bir çerçeve üzerine inşa edilir ve iç yüzeyleri oluşturmak için geniş ölçüde alçı ve yalıtım levhaları kullanılır. Avrupa'ya kıyasla, dış duvarlar için tuğla veya diğer tuğla ürünlerinin kullanımı çok daha azdır. Bu nedenle ABD'de hafif yalıtımlı sıvalar, harçlar ve gevşek dolgu yalıtımı daha az kullanılır, bu da perlitin ABD'de şekillendirilmiş ürünler için daha yüksek bir yüzdesinin kullanımına neden olur. Aşağıdaki bölümlerde perlitin şu anda kullanıldığı veya geleneksel bir malzemenin yerine kullanıldığı farklı inşaat uygulamaları açıklanmaktadır.

2.3.4.1.1 Alçı perlit esaslı sıva

Perlit, alçı ve su ile karıştırılarak, latta üzerine sıva yapmak için kullanılabilir ve bu şekilde gerilmelere ve sıcaklık değişimlerine dayanıklı, elastik bir duvar veya tavan sağlar. Gerçekten, alçı-perlit ve prefabrike alçı levhaların üretimi, perlitin ana kullanımlarından biri haline gelmiştir. GP kullanılarak yapılan sıvalar, hafiflikleri, kolay uygulanabilirlikleri ve yapısal çelikte yapılan tasarrufları ile karakterize edilirler. Gerilme altında çatlamaya karşı dirençlidirler, yüksek oranda yangına dayanıklıdır ve mükemmel ses emici özelliklere sahiptirler (Bates, 1960). Genleştirilmiş perlit agreganın kullanıldığı alçı sıvanın, geleneksel kumlu alçı sıvanın yaklaşık üçte biri kadar ağırlıkta olduğu ve altı kat daha fazla termal yalıtım değerine sahip olduğu iddia edildiğinin söylemiştir (Johnstone, 1961). Perlit, sıva ve harçların işlenebilirliğini artırabileceğini ve yüzeylerde bir doku oluşturmak için kullanılabileceğini söylemiştir (Kendall, 2000).

2.3.4.1.2 Beton

Beton, bir kompozit malzemedir ve hacminin yaklaşık %75'i agregalar tarafından işgal edildiğinden, betonun performansı büyük ölçüde agregaların özellikleri tarafından etkilenir. Hafif ve gözenekli agregaların betonun bir bileşeni olarak kullanımı, hafif betonların üretimini mümkün kılar (Sengul ve Tasdemir, 2002). Hafif betonlar, ekonomik faydalar sağlayarak ısı iletkenliğini ve birim ağırlığı azaltır. Birim ağırlığın azaltılması, yüksek binalarda depremlerin neden olduğu hasarı azaltmak için özellikle faydalı olacağını söylemişlerdir (Topçu ve Işıkdag, 2008). GP partiküllerinin düşük yoğunluğu, hafif

betonların üretimi için uygun hale getirir. Aynı zamanda, GP partikülleri termal yalıtımı büyük ölçüde artırır, gürültü iletimini azaltır ve çürüme, zararlı böcekler ve termitlere karşı dayanıklı olduğunu bildirmişlerdir (Pevzner ve Gontmakher, 2002). GP partikülleri yüksek su emme kapasitesine sahip olduğunu, bu nedenle düşük su/çimento oranına sahip betonlarda, çimentonun son aşamalarında su sağlayabileceğini ve bu özellik özellikle avantajlı olduğunu söylemişlerdir (Lura vd., 2004). GP partikülleri puzolanik aktiviteye sahip olabilir ve ince öğütüldüklerinde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirler (Yu vd., 2001). Hafif betonların özellikleri, puzolanik etkiye sahip olabilecek ve suyla birleştiğinde çimento benzeri özellikler sergileyebilecek silisli veya silisli ve alüminyum malzemeler olan puzolanların özellikleri ile değiştirilebilir (Yu vd.,2001; Şengül vd.,2011). Ancak, perlitli betonlar genellikle normal betonlardan farklılık gösterir. Şengül vd., (2011), doğal agrega (örneğin kum) kısmen GP parçacıklarıyla değiştirerek %0 ila %100 arasında, %20 artışlarla betonu hafiflettiler. Doğal kumun GP parçacıklarıyla değiştirilmesi, birim ağırlıklarında %8.4 ila %80.8 arasında bir azalmaya neden oldu ve betonun basınç dayanımında perlitin daha düşük dayanımı nedeniyle %40 ila %99.7 arasında bir azalmaya neden olmuştur. Topçu ve Işıkdag, (2008), doğal kumun %60 GP parçacıklarıyla değiştirilmesi durumunda betonun basınç ve çekme dayanımında sırasıyla yaklaşık %54 ve %47 azalma bildirmişlerdir. Eşlik eden hava hapsi de betonların dayanımını düşürmede etkili olmuştur. Sadece basınç dayanımı değil, elastisite modülü de olumsuz etkilenmiştir. Doğal kumun GP ile değiştirilmesi, Şengül vd., (2011) %20 ila %60 aralığında elastisite modülünde %34 ila %83 azalma bildirmişlerdir. Bunun nedeni, betonun elastisite modülünün sertleşmiş çimento hamuru ve betonun elastisite modülü fonksiyonu olmasıdır. Perlit agrega kullanılarak yapılan beton, püskürtme betonu veya daha ağır malzemelerle yapılan betonlardan daha güçlü olmayabilir, ancak 13.79 MPa'dan yüksek basınç dayanımı gerektirmeyen yerlerde kullanılabilir (Bates, 1960). Öte yandan, genişletilmiş perlit oranının artırılması, betonun termal yalıtımını iyileştirerek toplam gözenekliliği artırır. Gözeneklilik, betonun termal iletkenliğini etkileyen faktörlerden biridir. Kapalı gözeneklerin tanıtılması, havanın düşük termal iletkenliği nedeniyle termal iletkenliği azalttığını belirtmişlerdir (Şengül vd., 2011). Bu malzemeler, ısıtma, buhar veya soğutucu boruların çevresinde yalıtım sağlamak; fırınlar ve ocaklar için yalıtımlı tabanlar sağlamak; soğuk depolama tankları ve hafif yapısal güverte gerektiren her yerde yararlı olduğunu söylemiştir (Kendall, 2000).

2.3.4.1.3 Gevşek dolgu izolasyonu

Perlit, gevşek doldurma izolasyonu olarak kullanılması da dahil olmak üzere diğer önemli yapı uygulamaları için tercih edilir. Perlitin düşük yoğunluğu, termal izolasyon özellikleri ve yangına dayanıklılığı, boşluklu duvarlarda ve çekirdeklerin, çatlakların, harç alanlarının ve duvar tuğlalarının hava deliklerinin doldurulmasında gevşek doldurma izolasyonu olarak yaygın şekilde kullanılmasını sağlar. Alternatif olarak, cam elyafı, genişletilmiş polistiren köpük, boncuk ve paneller ve vermikülit gibi birkaç farklı malzeme kullanılabilir. Ancak perlitin yerleşmeyen ve serbest akış davranışına sahip olması, tercih edilmesini sağlar. (Kendall, 2000). Ayrıca, perlitin gevşek doldurma izolasyonu olarak kullanmanın, beton blokların boşluklarını doldururken ısı iletimini %50 ila %70 azalttığı

kanıtlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, çeşitli ortalama sıcaklıklarda termal iletkenlik ile yoğunluk arasında bir ilişki vardır. Rapor edilen verilere dayanarak, gevşek doldurma izolasyonu için 32-173 kg/m³ yoğunluğu önerilmiştir (Singh ve Garg, 1991). Ancak, perliti gevşek doldurma izolasyonu olarak kullanırken, su emme özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Perlitin nem emme özelliği, genişletilmiş perlitin yalıtım değerini olumsuz etkileyebilir veya perliti kullanan geleneksel bir duvar yapısında çökme sorunlarını artırabilir. Bununla birlikte, genişletilmiş perliti kaplama veya nem itici maddeyi karışıma ekleyerek sorun çözülmüştür. Örneğin, perliti sodyum silikat ile kaplamak, açık gözenekleri kapatarak nem direncini artırabilir ve böylece su tutma özelliğini azaltabilir (Yilmazer ve Ozdeniz, 2005). Alternatif olarak, silikon (ağırlığın %5'inden azı), doğal reçine veya bitümle karıştırılabilir (Berge, 2009; Englert, 1999). Ancak, silikon polimerleri pahalıdır ve kullanımlarıyla ilgili tehlikeler vardır. Bunun yerine, genişletilmiş perlitin ısı işlem görmesi, perlitin su emilimini azaltmada etkili olduğu bulunmuştur (Nelson, 2008). Isıl işlem sırasında genişletilmiş perlit, yüzeyini yumuşatmak ve birçok yüzey çatlağını iyileştirmek için yeterli sıcaklığa (genellikle 426 ila 537 °C arasında (Nelson, 2008)) ısıtılır. Yüzey çatlaklarının kapatılması, su emiliminde azalmaya neden olur.

2.3.4.1.4 Tavan döşemeleri

Son yıllarda tavan karo sistemlerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır çünkü ses emilimi, yangın direnci, iyi termal yalıtım, ışık yansıtma ve yapısal destek gibi avantajlar sağlar. Tavan karo sistemlerinin kullanımındaki artış, perlit kullanımının birçok tavan karosunun bileşeni haline gelmesine neden olmuştur. Standart tavan karoları genellikle mineral yünü veya cüruf yünü, cam elyafı, bağlayıcılar (örneğin nişasta) ve bazen inorganik dolgu maddeleri (örneğin mika, volastonit, silika, kalsiyum karbonat) kombinasyonundan yapılır. Genleştirilmiş perlit, karışıma eklenerek karonun akustik yalıtım, termal yalıtım ve yangın direnci özellikleri artırılır. Son ürünün istenen özelliklerine bağlı olarak, genişletilmiş perlit oranı toplam karışımın ağırlığının %0 ila %75'i arasında değişebilir. Dahası, perlit, karonun görünür yüzeyinde farklı dokular oluşturmak için kullanılabilir. (Kendall, 2000)

Tavan perlitik karolarında nişasta, bilinen bir bağlayıcıdır. Bu bağlayıcının kullanımı, malzemenin boyandığında renk değiştirmemesi ve malzemeye sızdırmaması nedeniyle akustik veya ses yalıtımı için faydalı bulunmuştur. Baig, (2012), nişasta kullanarak kabul edilebilir özelliklere sahip, iyileştirilmiş drenaj süresi ve daha düşük üretim maliyetleri olan akustik perlitik karolar üretmiştir. Denning vd., (1962) ayrıca nişasta kullanarak yalıtım levhaları üretmiş ve beklenmedik bir su itici özelliğin olduğunu rapor etmişlerdir. Ürün üç hafta boyunca suda bekletildiğinde malzemenin hafifçe yumuşadığı görülmüştür. Daha büyük bir su iticiliği elde etmek için su itici bir madde eklenmesi önerilmiştir. Ancak, akustik panellere su iticiliği eklenmesi, panonun rengini değiştirmeyecek maddelerle sınırlıdır. Nişasta kullanılarak yapılan ses yalıtım panolarının örnekleri çizelge 2.4'te verilmiştir. Ancak, nişastanın kullanımıyla ilgili bir sorun, belirli çevresel koşullar altında, örneğin artan sıcaklık ve nem altında, panonun boyutsal kararlılığını kaybetmesidir. Bu sorunla başa çıkmak için lateks bağlayıcılar faydalı bulunmuştur. Kesky, (1992) ve Deporter vd., (2000), lateks bağlayıcı kullanarak perlitli tavan karoları

üretirken, lateks bağlayıcı ile yapılan perlit yalıtım panolarının, nişasta ile yapılan perlitli tavan karolarına göre daha yüksek MOR (Kırılma Modülü), daha yüksek kırılma yükü, daha düşük su emilimi ve daha iyi boyutsal kararlılığı olduğunu bildirmişlerdir. 30°C ila 110°C aralığında cam geçiş sıcaklığına sahip, tavana karolarında kullanışlı lateks bağlayıcı örnekleri arasında polivinil asetat, vinil asetat/akrilik emülsiyon, viniliden klorür, polivinil klorür, stiren/akrilik kopolimer ve karboksile stiren/bütadien (Izard, 1993) bulunur.

Çizelge 2.5: Nişastanın bağlayıcı olarak kullanıldığı perlitik ses yalıtım levhalarına örnekler (Denning, 1962)

Örnek	1#	2#	3#	4#
Genleştirilmiş perlit..... yüzde	67,50	62,50	49,60	60,00
Kâğıt hamuru lifi..... yüzde	22,50	27,50	28,90	30,00
Nişasta..... yüzde	10,00	10,00	20,00	10,00
Kopma modülü kPa	357,84	488,84	409,55	536,41

2.3.4.1.5 Zemin altı izolasyonu

ASTM C549 standardına uygun olarak üretilen, su itici özellikli, toz halinde preslenmiş perlit, zemin altı yalıtımı için kullanılır. Perlit zemin altı yalıtımı, yüzen beton zeminlerin altında, asfalt zeminlerin altında ve yüzen ahşap zeminlerin altında (kalınlık 6-10 cm) kullanılabilir. Özellikle, yapının farklı bileşenlerinden, zeminden duvarlara, adımlardan ve zemin altı boru sistemlerinden gelen ses iletiminin azaltılmasında etkilidir. Ayrıca perlitin nötr pH değeri, zemin altına yerleştirilebilecek boru ve elektrik tesisatında korozyon gelişimini önler (Singh ve Garg, 1991).

2.4 Geopolimerde sülfat etkisi

Fiziksel sülfat saldırısı (FSA), beton dayanıklılığına etki eden bir bozulma mekanizmasıdır ve genellikle ilgili ancak ayrı bir mekanizma olan kimyasal sülfat saldırısıyla karıştırılır. FSA, sülfatlar ve beton mineralleri arasında kimyasal bir reaksiyon olmadığından kimyasal sülfat saldırısından farklılık gösterir. Bunun yerine, beton gözenek duvarları üzerinde genleşmeli basınç uygulayan nüfuz eden sülfat tuzlarının faz değişimlerini içerir ve donma-çözülme bozulmasına benzer bir şekilde gerçekleşir (Haynes vd., 2008).

FSA'nın mekanizmaları hala iyi anlaşılammış olsa da, neredeyse tüm FSA vakalarında tuzlar sülfat tuzlarıdır ve bozulma, sıcaklık ve nemdeki değişiklikler tarafından büyük ölçüde yönlendirilmektedir (Haynes vd., 2008). Sülfat tuzlarının buharlaşma ve konsantrasyonundan kaynaklanan hasar riski uzun süredir fark edilmektedir. Ancak FSA mekanizması, hem saldırı formlarının aynı anda gerçekleşebileceği için kimyasal sülfat saldırısından ayrılmamıştır.

FSA, tuz kaynağı, ıslanma-kuruma döngüleri ve/veya arid nemin bir kombinasyonunun bulunduğu kıraç ve kıyı bölgelerindeki gözenekli malzemelerin önemli bir bozulma mekanizmasıdır (Cooke ve Smalley, 1968). Sülfat içeren yeraltı suyuna maruz kalan beton elemanları, diğer yüzeyi buharlaşma ile temas halinde olduğunda sülfat çözeltilisinin yerden kapiler hareketle emilimi nedeniyle bu saldırıya maruz kalır (Zhutovsky ve Hooton, 2017b). Çözelti, döngüsel nem veya sıcaklık değişiklikleri sırasında süpersatürasyona ulaştığında, sodyum sülfat mineralleri thenardite ve mirabilite arasında faz değişiklikleri meydana gelir ve genişlemeli kuvvetler oluşturur. Bu da betonun yakın yüzey tabakasının giderek pul pul dökülmesine neden olur.

Sodyum sülfat, geniş bir yayılıma sahip, iyi belgelenmiş ve son derece yıkıcı olduğu için FSA ile yaygın olarak ilişkilendirilir (Sperling ve Cooke, 1985; Folliard ve Sandberg, 1994). Diğer tuzlara kıyasla, sodyum sülfat özellikle zararlı olabilir, çünkü keskin çözünürlük eğrilerine sahip olduğundan buharlaşma ve soğutma yoluyla kolayca aşırı doymaya neden olur (Sperling ve Cooke, 1985; Folliard ve Sandberg, 1994).

FSA üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. 2009'da ACI, bu konuda yeni bir alt komite oluşturdu (Liu vd., 2014). Bununla birlikte, betonun FSA'dan kaynaklanan hasara karşı direncini değerlendirmek için standart testler henüz mevcut değildir. Beton direncine katkıda bulunan faktörler hala analiz edilmektedir. Zhutovsky ve Hooton (2017'a, b), Folliard ve Sandberg (1994) tarafından geliştirilen bir hızlandırılmış test yöntemi kullanarak su-çimento oranının ve katkılı çimento malzemelerinin etkisini incelemiştir. Test, sülfat çözeltilinde tamamen batırma işlemi ile termal döngülerin birleştirilmesini içeriyordu.

2.4.1 Farklı sülfat çözeltilerinde daha önce yapılan çalışmalar

Betonlarda sülfat saldırısı genellikle Mg^- ve Na^- sülfat sistemlerine odaklanan bir araştırma alanıdır. Aslında, çoğu standart kod sülfat hassasiyetini araştırmak için Mg^- ve Na^- sülfat çözeltilerini belirler (AS2350.14, 2006). Ancak, kullanılan sülfat konsantrasyonları ve maruz kalma süreleri araştırmalar arasında farklılık göstermektedir. Örneğin, Oymael, (2008) çalışmasında, çimento harçları %5 ve %10 $MgSO_4$ çözeltisine 14 ve 28 gün boyunca yerleştirmiştir. Hartshorn vd., (2002) ise, kireçtaşıyla birlikte veya kireçtaşı olmadan harç prizmalarını bir yıl boyunca $MgSO_4$ çözeltisine batırmıştır. Oymael (2008) çalışması, harç örneklerinin 28 gün sonra artan SO_3 yüzdesine sahip etrenjit oluşumuyla sonuçlandığını belirtmiştir. Hartshorn vd., (2002) çalışması ise, prizmaların yüzey katmanının, jips, taumasit ve brusit oluşumundan dolayı parçalandığını ve pütürlü hale geldiğini sonuçlandırmıştır. SEM görüntüleme ayrıca taumasit'in çimentoda oluştuğunu ve yüzeydeki ana sülfat saldırısı olduğunu göstermiştir.

Sata vd., (2012), yalnızca GP çimentosu içeren harçların, ince geopolimer içeren harçlardan daha fazla genişlediğini ve bu genişlemenin sülfat ile etrenjit, alçı ve kalsiyum monosülfat alüminat oluşturan kalsiyum hidroksit reaksiyonlarından kaynaklandığını belirtmiştir. Bu tür reaksiyonlar genişlemeye, çatlaklara, dayanım kaybına ve yüzey kabarmasına neden olmuştur (Snelson ve Kinuthia, 2010; Yang vd., 1996). Benzer şekilde, Sata vd., (2012) tarafından yapılan araştırmada, hem % 5 Na_2SO_4 hem de % 3 H_2SO_4

çözeltilerinde OPC ve taban kül içeren harçlar zamanla genişlemiştir, Na₂SO₄'te ağırlık artışı olduğunu gösterirken, H₂SO₄ çözeltisinde harçlar zamanla ağırlık kaybetmiştir.

Bazı çalışmalar, betonlarda sülfat saldırısını araştırmak için Mg²⁺ ve Na⁺ sülfat sistemlerine odaklanırken, bazı araştırmalar alternatif sülfat sistemlerini kullanmıştır. Örneğin, Stevulova vd., (2012), kısmen batırılmış beton bloklarını sülfürik asit ve alüminyum sülfat çözeltileri ile birlikte uygulamıştır. Çalışmanın sonunda blokların ıslak kısımlarında beyaz ve turuncu kristal kaplamaları gözlemlenmiştir. Ancak, bazı renk değişimleri üst kısımlarda ve batırılmayan yüzeylerde de gözlemlenmiştir, bu da çözeltinin örnek boyunca kapiler etki yoluyla üst yüzeydeki açık kısma transfer edildiğini göstermiştir. Bazı çalışmalar sülfat tuzlarını katkı maddesi olarak kullanmıştır ve bu da çimento hamurunun özelliklerini değiştirebileceğini belirtmişlerdir. Örneğin, Brykov vd., (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, Al₂(SO₄)₃ çimento ağırlığının %3'ü kadar eklenmiş ve 28 gün sonra çimento hamuru dayanımı artmıştır. Ancak, Al₂(SO₄)₃'ün %3'ten daha yüksek olduğunda dayanımı azaltmıştır.

Bakharev (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uçucu kül ile üretilen geopolimer malzemelerin sülfata karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışmada %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat karıştırılarak hazırlanan geopolimer malzemeleri, 5 ay boyunca bekletilmiştir. Farklı geopolimer malzemeler üretmek için su/bağlayıcı oranı 0.30 ve sodyum içeriği %8-9 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca, aynı sülfat ortamında Portland çimentolu numuneler de test edilmiştir. Bu numunelerin sülfat içinde ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer malzemelerin önemli bir değişiklik göstermediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, geopolimer malzemelerin Portland çimentolu betonlara göre daha iyi basınç dayanımı sergilediği tespit edilmiştir.

Thokchom vd., (2010), yaptıkları çalışmada, UK tabanlı geopolimer harçların magnezyum sülfat çözeltisi içindeki performansını incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bu deneyde numuneler %10 magnezyum sülfat çözeltisi içinde 24 hafta boyunca bekletilmiştir. Bu numunelerin görsel görünümü, pH değişimi, ağırlıktaki kayıp ve basınç dayanımındaki değişiklikler incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer numunelerin görsel görünümü önemli bir değişiklik olmadan ve çatlama olmadan sağlam kalmıştır. Geopolimer harç numunelerinin pH değeri, başlangıçta 7.92 olarak tespit edilmiş, ancak 18 hafta sonra önemli ölçüde artarak pH değeri 9 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, %10 magnezyum sülfat çözeltisi içinde bulunan numunelerin ağırlıkları zaman içinde artmıştır. %5 Na₂O içeriğine sahip numunelerde ağırlık artışı maksimum düzeyde olurken, %8 Na₂O içeriğine sahip numunelerde minimum ağırlık artışı gözlemlenmiştir. 24 hafta sülfata maruz kalan numunelerde, en yüksek Na₂O içeriğine sahip numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

El-Sayed vd., (2011), yaptıkları çalışmada, YFC kullanarak farklı oranlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren geopolimer malzemelerin %5 MgSO₄ çözeltisi içindeki mekanik özelliklerini ve pH değerlerini incelemişlerdir. Farklı alkali aktivatör oranları kullanarak pH ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. %3 sodyum hidroksit ve %3 sodyum silikat kullanıldığında maksimum pH değeri elde edilmiştir. En düşük pH değeri ise %2 sodyum

hidroksit içeren numunelerde belirlenmiştir. Düşük sodyum silikat oranına sahip numunelerin düşük mekanik özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir. %5 MgSO₄ çözeltisine 6 ay boyunca maruz bırakılan numunelerde, %3 sodyum hidroksit ve %3 sodyum silikat kullanılan numunelerde maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Sonuç olarak, geopolimer malzemelerin sülfata karşı dayanıklılığının olduğu tespit edilmiştir.

Khatib ve Wild (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çimentoya farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15, 20 ve 25) MK ilave edilerek 6 farklı harç karışımı oluşturulmuş ve bu harç numuneleri %5 sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisi içinde genleşme, basınç değişimi ve ağırlık değişimi gibi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Harç numunelerinin genleşmesi 520 güne kadar takip edilmiştir. %5 ve %10 MK ilave edilen harç numuneleri, 40. ve 70. günlerde hızlı bir genleşme sergilemiştir. Ancak %20 ve %25 MK ilave edilen harç numunelerinde önemli bir genleşme gözlenmemiştir. Yüksek C₃A içeren sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan harç numuneleri, MK miktarının artmasıyla basınç dayanımında bir artış olduğunu göstermiştir. Tüm numunelerde ağırlık değişimi gözlenmiş ve en fazla artış %5 MK ilave edilen harç numunelerinde gözlenmiştir.

Thokchom vd., (2011) tarafından yapılan çalışmada, UK ve silis dumanı kullanarak geopolimer numunelerin fiziko-mekanik özellikleri incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak uygun miktarlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak %8 Na₂O içeriğine sahip geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Bu üretilen numuneler, %10 magnezyum sülfat çözeltisi içinde 15 hafta boyunca bekletilmiş, görsel görünüm, ağırlık değişimi ve basınç dayanımındaki değişiklikler incelenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan geopolimer numunelerinin fiziksel görünümü mikroyapısına bakılarak 12 hafta sonra iğne şeklinde uzun kristal yapılar oluşturmaya başlamıştır. Ayrıca, ağırlık değişimi 15 hafta boyunca izlenmiş ve 9. haftada ağırlık değişimi artarak maksimum değere ulaşmıştır. Ek olarak, magnezyum sülfat çözeltisine silis dumanı katılan geopolimer hamur numunelerinde daha düşük basınç dayanımı elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak, silis dumanı katılarak oluşturulan geopolimer harç numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisi içinde daha iyi mekanik özellikler sergilediği gözlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Yüksek fırın cürufu

Geopolimer harç üretimi için kullanılan YFC, Karabük ilindeki Karçimsa firmasından temin edilmiştir. Temin edilen YFC'nun özgül yüzeyi 3996 cm²/g ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm³'tür. YFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.32	0.82
Bileşim (%)	S ⁻²	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cl
YFC	0.33	0.31	0.85	1.16	3.51	0.015



Şekil 3.1: Yüksek fırın cürufu

3.1.2 Kum

Geopolimer harç karışımlarında 0-2 mm tane boyutu aralığında dere kumu kullanılmıştır. Dere kumunun özgül ağırlığı 2.56 g/cm^3 'tür. Ayrıca kumun görünümü Şekil 3.2.'te sunulmuştur.



Şekil 3.2: Kum

3.1.3 Genleştirilmiş Perlit

GPA, İstanbul'daki Genper Genleştirilmiş Perlit Tesisleri'nden temin edilmiştir. Bu agrega karışımlarda kumun yerine %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında kullanılmıştır. Genleştirilmiş perlitin özgül ağırlığı 0.055 g/cm^3 'tür GPA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 3.2: Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikleri		Kimyasal Özellikleri	
		Bileşen	(%)
Yoğunluk (kg/m^3)	32-200	SiO_2	71-75
Renk	Beyaz	Al_2O_3	12-16
Erime Noktası($^{\circ}\text{C}$)	1300	Na_2O	2.9-4.0
Isı İletkenliği (W/mK)	0.034-0.045	CaO	0.2-0.5



Şekil 3.3: Genleştirilmiş Perlit

3.1.4 Aktivatör

Bu tez çalışmasında YFC'yi aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. 12 mol NaOH çözeltisi elde edilebilmek için musluk suyu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan NaOH'in kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13

3.1.5 Sülfatlar

MgSO₄ ve Na₂SO₄ içme suyu ile ayrı ayrı %3 MgSO₄ ve %3 Na₂SO₄ konsantrasyonlu olarak karıştırılıp 4, 8 ve 12 hafta sonunda numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcal geçirimsizlik, ağırlık değişimi gibi harç özellikleri incelenmiştir. Deneyde kullanılan sülfatlar Şekil 3.3'de verilmiştir.

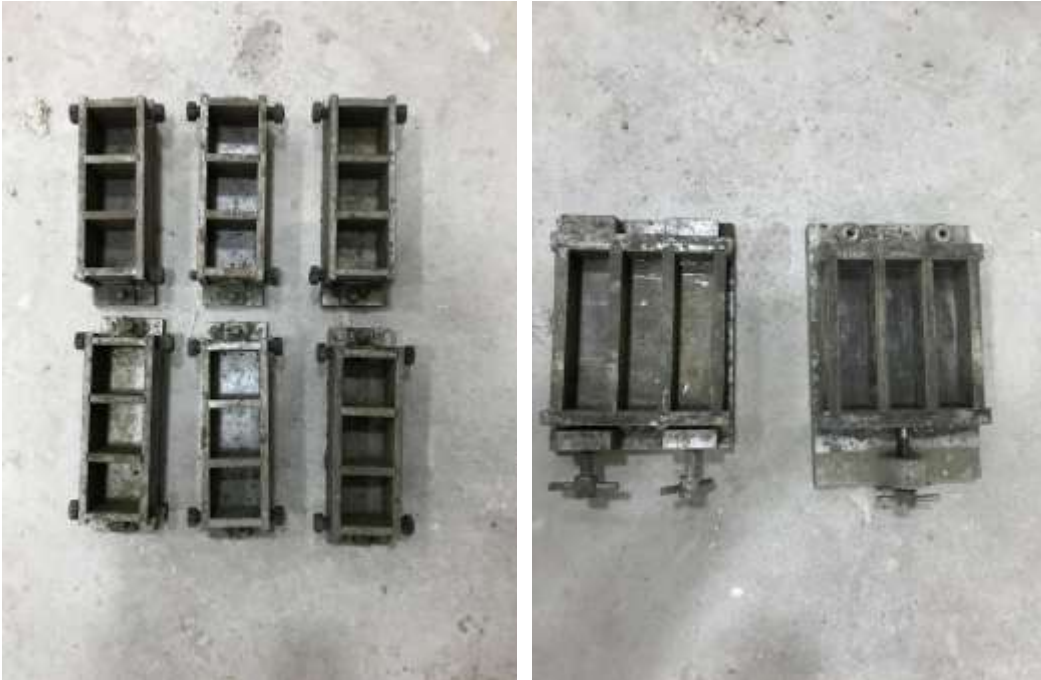


Şekil 3.4: Deneilerde kullanılan sülfatlar

3.1.6 Aletler

3.1.6.1 Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer harç numuneler Şekil 3.5'te görülen 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutuna sahip çelik kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5: Çelik kalıplar

3.1.6.2 Beton karışım mikseri

Geopolimer harç üretiminde kullanılacak olan malzemeleri karıştırmak amacıyla ARMATEST marka laboratuvar tipi beton karışım mikseri kullanılmıştır. 5 litre kapasiteli ve düşük hızda karıştırma kabı yörüngesinde 62 devir/dakika, yüksek hızda karıştırma kabı yörüngesinde 125 devir/dakika hız gibi karışım seçeneklerine sahip olan beton karışım mikseri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Beton harç mikseri

3.1.6.3 Hassas terazi

Çalışma aşamalarında ağırlık ölçümleri için Şekil 3.7'de görülen 0.01 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.7: Hassas terazi

3.1.6.4.Etv

Sülfat sonrası numunelerin kılcal geçirimsizlik tayini deneylerinde Şekil 3.8'deki Mikrotest marka dijital termostatlı etv kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Etüv cihazı

3.1.6.5 Basınç dayanım cihazı

Üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.9'da görülen ELE marka 3000 kN yükleme kapasitesine sahip tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9: Basınç dayanım cihazı

3.1.6.6 Eğilme dayanım cihazı

Üretilen geopolimer numunelerin eğilme dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.10'da görülen eğilme dayanım test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.10: Eğilme dayanımı cihazı

3.1.6.7 pH metre

Hazırlanan sülfat çözeltilerin pH'larının ölçülmesi için Şekil 3.11'deki Hanna marka pH metre kullanılmıştır.



Şekil 3.11: pH metre

3.2 Yöntem

Bu bölümde, geopolimer harç karışım oranlarının belirlenmesi, bu oranlara göre karışımların hazırlanması, kalıplara dökülmesi ve kür edilmesi aşamaları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, sülfat çözeltilerinin geopolimer harç numunelerine olan etkisini değerlendirmek amacıyla yapılan ölçümler ve analizler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu adımların dikkatlice takip edilmesi ve standartlara uygun olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

3.2.1 Geopolimer harç karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Geopolimer harç üretimi için bağlayıcı malzeme olarak YFC kullanılmıştır. Bağlayıcı dozu 400 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Agregada olarak kum ve genişletilmiş perlit kullanılarak geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Kumun yerine hacimce %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında GPA kullanılarak 6 farklı grup geopolimer harç karışımı hazırlanmıştır. Karışım dizaynı hesaplanırken bağlayıcı: alkali çözeltisi: kum oranları 1:0,8:3 olarak kullanılmıştır. Geopolimer harç karışım kodları Çizelge 3.4'te verilmiştir. Literatür çalışmalarının incelenmesi ve laboratuvar deneyleri sonucunda optimum silis modülü 1.5, çözelti/bağlayıcı oranı 0.80 ve çözelti molaritesi 12 M olarak belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda aktivatör miktarı ve hacmi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.4: Geopolimer harç kodları

Geopolimer harç kodu	Hacimce agrega oranı (%)	
	GPA	KUM
C0	0	100
C1	10	90
C2	20	80
C3	30	70
C4	40	60
C5	50	50

Çizelge 3.5: Karışımda kullanılan malzeme miktarları

Karışımlar	C0	C1	C2	C3	C4	C5
YFC (kg)	400	400	400	400	400	400
Kum(kg)	1200	1080	960	840	720	600
GPA(kg)	0	7.03	14.06	21.10	28.12	35.15
NaOH çözeltisi, (kg)	320	320	320	320	320	320

3.2.2 Geopolimer harç üretimi, numunelerin yerine konması ve kür edilmesi

Geopolimer harç üretimi için belirlenen malzemeler 0.1 g hassasiyetli terazide tartılarak karışıma hazır hale getirilmiştir. İlk önce alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmıştır. Daha sonra sırasıyla YFC, kum ve GPA harç karıştırma mikserine eklenerek karıştırılmıştır. Hazır hale getirilen geopolimer harç numunelerinin yağlanan 50x50x50 mm ve 40x40x160 mm boyutuna sahip çelik kalıplara düzgün şekilde yerleşmesini sağlamak için hem şişleme çubuğu kullanılmış hem de tokmakla vurularak titreşim etkisi oluşturulmuştur. Yerleştirilen numunelerin yüzeyi mala ile düzeltilip 24 saat kalıpta bekletilmiştir. 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılan numuneler oda koşullarında deney gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 3.12: Kalıplara yerleştirilmiş geopolimer harç numuneler

3.2.3 Sertleşmiş harç deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışmanın kapsamında üretilen geopolimer harç numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra %3 konsantrasyonundaki Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerine yerleştirilmiştir. Numuneler, 12 hafta boyunca bu çözeltilerde bekletilmiş ve bu süre içinde basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik değerleri ve ağırlık değişimleri ölçülmüş, ayrıca görsel olarak da değişimleri incelenmiştir. Bu ölçüm değerleri, kontrol numunelerinden elde edilen ölçüm değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1 Basınç dayanımı

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri, TS EN 12390-3/AC (2012) ve ASTM C39/C39M test yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Geopolimer harç numuneleri, 6 farklı grup olarak üretilmiş ve hazırlanan karışımlar kalıplara dökülerek oda koşullarında bir gün bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak deney gününe kadar bekletilmiştir.

Geopolimer harç numuneleri basınç dayanım test cihazına yerleştirilirken, yükleme yönü numunelerin döküm yönüne dik olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin yükleneceği cihazın yüzeyleri önceden temizlenmiştir. Numuneler düzgün bir şekilde cihaza yerleştirildikten sonra cihazın ekranından numune boyutları seçilerek, otomatik olarak numuneler 2.40 kN/s yük hızıyla yüklenmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri, Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır. Basınç dayanımları belirlenirken, her bir karışım için 4 adet numune üretilmiş ve bu 4 numunenin basınç dayanımının aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

$$F_c = P/A_c \quad (3.1)$$

F_c : Basınç dayanımı, MPa

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²

3.2.4.2. Eğilme dayanımı

Yapılan çalışmalar sonucunda, geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımlarını belirlemek amacıyla, SHIMADZU marka deney aleti TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak kullanılmıştır. Bu deney için her bir gruptan 40x40x160 mm boyutlarında numuneler seçilmiştir. Numuneler, 28 günlük kür süresinin ardından yükleme tablasında mesnetlere oturtularak deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımları Denklem 3.2 kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma = 3FL / 2BH^2 \quad (3.2)$$

F : Numunenin taşıyabildiği maksimum yük (N)

L : Mesnetler arasındaki mesafe (mm)

B : Numune kesitinin kuvvete dik doğrultudaki uzunluğu (mm)

H : Numune kesitinin kuvvet doğrultusundaki uzunluğu (mm)

3.2.4.3 Kılcal geçirimlilik deneyi

Kılcal geçirimlilik deneyleri, ASTM C1585 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney için numuneler, sülfat sonrası etüvde $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numunelerin yan yüzeyleri su geçirmemesi için suya dayanıklı bir bantla kenarları sarılmıştır. Ardından numuneler, alt yüzeylerinden 5 mm suya temas edecek şekilde hazırlanan düzeneğe yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Kronometre aynı anda başlatılmış ve 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakika sürelerinin sonunda numunelerin yüzeyindeki su bir havlu ile silinmiş ve 0.01 g hassasiyetli bir teraziyle tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin birim alanda kapiler olarak emdiği su miktarı kullanılarak kılcal geçirimlilik katsayısı, Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca deney sonuçları, üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerinin sülfat sonrası kılcal geçirimlilik değerleri belirlenirken, aşağıda verilen yöntem kullanılmıştır.

$$S = I / t^{0.5} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{mt}{a \times d} \quad (3.4)$$

S: Numunelerin geçirgenlik değerleri, ($\text{cm}/\text{s}^{0.5}$).

I: Numunelerin su emmesi, (cm).

t: Zaman, (s).

mt: Numunelerin t zamanına bağlı olarak ağırlık değişimi, (g).

a: Numunenin açıkta kalan yüzey alanı, (cm^2).

d: Suyun yoğunluğu, (g/cm^3)



Şekil 3.13: Kılcal geçirimlilik düzeneğindeki numuneler

3.2.4.4. Ağırlık değişimi

ASTM C 267 standartına göre, numunelerin ağırlık değişimleri hesaplanmıştır. Sülfat etkisiyle meydana gelen deformasyonları belirlemek için birim ağırlık kaybı deneyi yapılmıştır. Bir numunenin ağırlık kaybını bulmak için, sülfat etkisi öncesi ve sonrasında 0.01 hassasiyetli bir teraziyile tartılmış ve bu iki ağırlık arasındaki farkın 100'e oranlanmasıyla ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Deney sonuçları, her 2 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Ağırlık kaybı, Denklem 3.5 yardımıyla hesaplanmıştır.

Ağırlık kaybı

$$(\%) = ((W-W_0) / W_0) \times 100 \quad (3.5)$$

W₀: Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g

W: Numunenin deney sonrası ağırlığı, g

3.2.4.5 Sülfat etkisi

Oluşturulan geopolimer harç numuneleri, 28 günlük kür süresini tamamladıktan sonra ayrı ayrı %3 MgSO₄ ve %3 Na₂SO₄ çözeltilerine yerleştirilmiştir. Numuneler, çözeltide belirli periyotlarda (4, 8 ve 12 hafta) ağırlık değişimleri için ölçülmüştür. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri de aynı periyotlarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

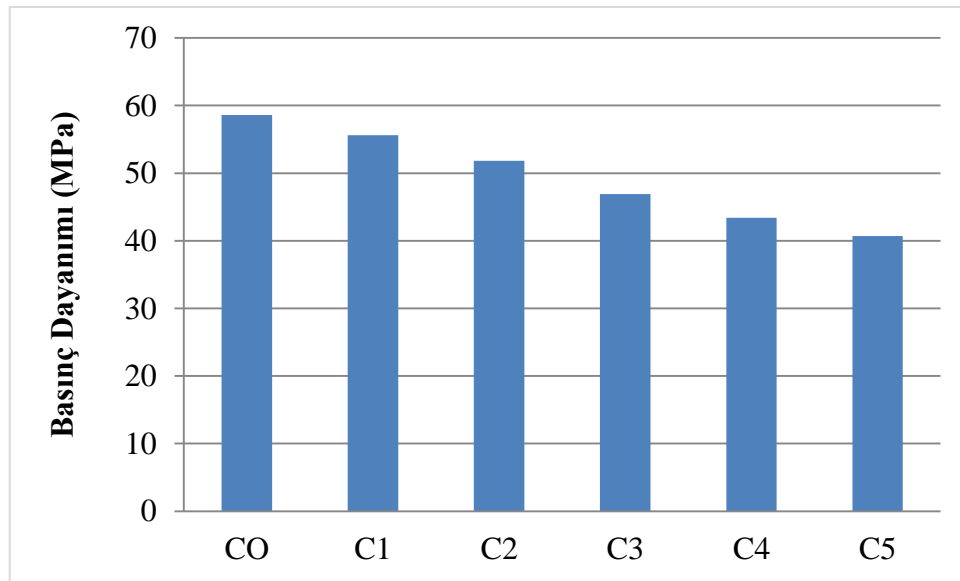
4.1 Sertleşmiş Harç Deneyleri İle İlgili Bulgular Ve Tartışma

4.1.1 Kontrol numuneleri basınç dayanımları

Bu numuneler, %3 konsantrasyonda Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerinde 12 hafta boyunca bekletilmiştir. 4, 8 ve 12 hafta sonunda çözeltiden çıkarılan numunelerin basınç dayanımları ölçülmüş ve 28 gün oda koşullarında bekletilen kontrol numunelerinin basınç dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları, Çizelge 4.1'de verilmiş ve Şekil 4.1'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları GPA arttıkça azalmıştır.

Çizelge 4.1: Kontrol numuneleri basınç ve eğilme dayanımı

Karışım	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
C0	6.50	58.60
C1	6.24	55.60
C2	5.95	51.80
C3	5.77	46.90
C4	5.67	43.40
C5	5.56	40.70



Şekil 4.1: 28 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı (58.6 MPa), C0 kodlu karışımda elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise (40.7 MPa), C5 kodlu karışımda gözlemlenmiştir. Numunelerdeki GPA ikame oranı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. GPA içermeyen numunelerin basınç dayanımları, %10, %20, %30, %40 ve %50 GPA içeren numunelerle karşılaştırıldığında, dayanım kaybı %5.1, %11.6, %20.26, %26 ile %30.5 oranlarında değişmiştir.

Geopolimer harçlarda, GPA kullanılmasıyla basınç dayanımının azalmasına birkaç neden vardır. Bu nedenler arasında, GPA'nın düşük yoğunluğu önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, harç içinde daha fazla hava boşluğunun oluşmasına neden olur. Hava boşlukları, harcın yoğunluğunu azaltır ve dolayısıyla basınç dayanımını düşürür. İkinci olarak, zayıf bağlanma etkisi söz konusudur. GPA, diğer agregalara kıyasla daha düşük bir yüzey alanına sahiptir. Bu da bağlanma gücünü azaltır ve harçtaki bileşenler arasındaki etkileşimi zayıflatır. Sonuç olarak, basınç dayanımı azalır. Son bir neden ise porozite artışıdır. GPA'nın benzersiz yapısı, harçta artan poroziteye neden olur. Bu da su emilimini artırır ve harcın daha fazla suyu hapsedmesine yol açar. Sonuç olarak, harç daha az sertleşir ve basınç dayanımı azalır.

Topçu vd., (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, GPA normal agregayla %0 ila % 60 arasında değiştirilmiştir. Bu çalışmada, beton karışımlarında minimum birim ağırlığın 300 dozajda 1800 kg/m³ olarak elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, çimento türlerine bağlı olarak GPA %30'luk yer değiştirme oranlarında 20 ila 30 MPa arasında basınç dayanımları elde edildiği ifade edilmiştir. Mekanik özelliklerde bazı kayıplar olsa da, geliştirilmiş perlit agregalı betonların yeterli değişim oranına sahip hafif beton olarak kullanılabilceği vurgulanmıştır.

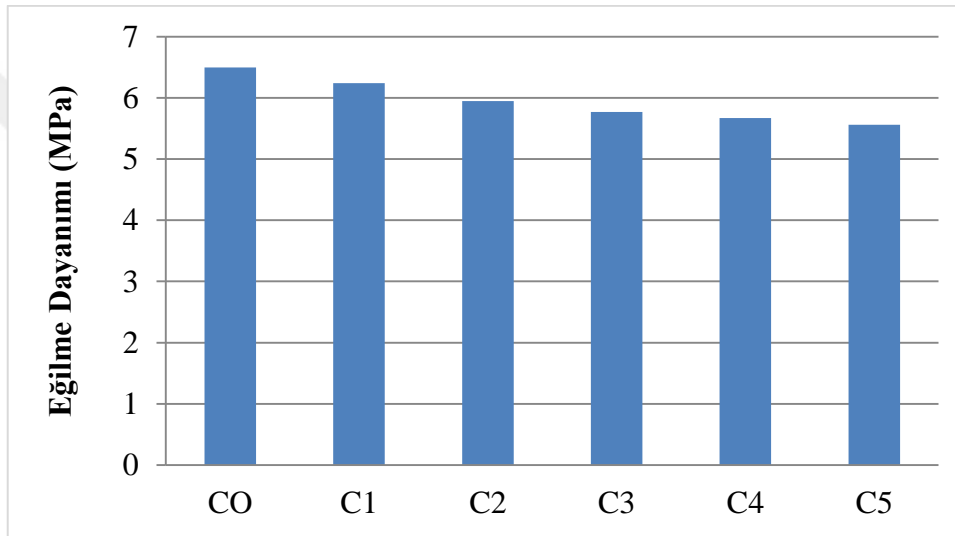
Hafif betonun mekanik özellikleri ve ısı iletkenlikleri üzerine yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada (Taşdemir vd., 2017), pomza ve geliştirilmiş polistiren agregası kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, hafif betonlar üretilmiştir ve bu betonların birim hacim ağırlıkları 300-1800 kg/m³ arasında değişmiştir. Aynı zamanda daha önce çalışılan GPA ile üretilen betonların özellikleriyle de karşılaştırma yapılmıştır. Agregası tipi ve kullanım miktarı betonların hem birim ağırlıklarının azalmasına hem de hafif agregası kullanımıyla ısı iletkenliklerinin azalmasına neden olmuştur. Bu çalışmada birim hacim ağırlığı ile ısı iletkenlik arasında olumlu bir ilişki tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlığının azalmasıyla birlikte betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü de azalmıştır. Geliştirilmiş polistiren içeren betonda basınç dayanımındaki azalma daha belirgin görülmüştür. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki olduğu rapor edilmektedir.

Polat, (2007) yaptığı çalışmada, beton numuneleri elde etmek için GPA, pomza agregası ve hava sürükleyici olarak katkı maddesi kullanmıştır. Bu çalışma, betondaki kılcal geçirimsizlik, birim ağırlık ve basınç dayanımının 100 donma-çözülme çevrimi sonucunda nasıl etkilendiğini belirlemeyi amaçlamıştır. Beton numuneleri üretmek için, karışıma 0-2 mm'lik ince agregası yerine %10, %20 ve %30 oranlarında pomza agregası ve GPA eklemiştir. Ayrıca, %0.1 oranında hava sürükleyici katkı maddesi de kullanmıştır. Yapılan

çalışma sonucunda, GPA ve pomza agregası miktarının artmasıyla birlikte basınç dayanımının ve birim ağırlığının azaldığı görülmüştür.

4.1.2 Geopolimer harç kontrol numunelerinin eğilme dayanımı

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2, yapılan çalışmalar sonucunda üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük kür süresinin ardından ölçülen eğilme dayanım değerlerini göstermektedir. Elde edilen verilerin incelenmesi sonucunda, GPA ikamesi arttıkça numunelerin eğilme mukavemetlerinde azalış olduğu gözlemlenmiştir. GPA içermeyen numunenin eğilme mukavemeti 6.5 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, %10, %20, %30, %40 ve %50 GPA içeren numunelerin eğilme mukavemetleri 5.56 ile 6.24 MPa arasında değişmektedir. GPA ikamesi ile numunelerin eğilme dayanımları %4, %8.5, %11.2, %12.8 ve %14.5 oranlarında azalmıştır.



Şekil 4.2: Geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımları

GPA kullanılması, geopolimer harçların eğilme dayanımını azaltma potansiyeline sahiptir. Bu durumun birden fazla nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, agreganın homojen bir şekilde dağılması ve etkin bir bağlanma sağlanması zor olmuştur. GPA, kumdan farklı bir yapıya sahip olduğu ve düşük yoğunluğa sahip olduğu için, harç matrisinde daha fazla boşluk oluşmasına yol açmıştır. Bu da eğilme dayanımının azalmasına sebep olmuştur. İkinci olarak, GPA doğal olarak gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözenekler, agregada hava veya su birikmesine neden olmuştur. Bu durum, harç matrisinde gözeneklilik artışına yol açarak eğilme dayanımını olumsuz etkilemiştir. Üçüncü olarak, GPA ve geopolimer bağlayıcı arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimler, eğilme dayanımını etkilemiştir. Agreganın yüzeyinin kaplanması yetersiz olabilir ve bu da agregabağlayıcı ara yüzünde zayıf bir etkileşim oluşmasına neden olmuştur. Bu durum da eğilme dayanımının azalmasına katkıda bulunmuştur. Son olarak, GPA mekanik özellikleri eğilme dayanımını etkilemiştir. Daha düşük sertlik veya dayanıklılık, agreganın deformasyona karşı daha zayıf olmasına ve dolayısıyla eğilme dayanımının azalmasına yol açmıştır.

Özkan vd., (2018) yaptığı çalışmada MK bazlı geopolimer harcın eğilme dayanımı, farklı perlit yüzey alanı oranlarının kullanılmasıyla incelenmiştir. Deney, ASTM C1609 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi hazırlanan numuneler, 40x40x160 mm boyutlarında ve 3 farklı perlit yüzey alanı oranına sahiptir: %0, %20 ve %40. Numuneler, önceden belirlenmiş karışım oranına göre hazırlanmış MK bazlı geopolimer harç kullanılarak imal edilmiştir. Hazırlanan numuneler, 28 gün boyunca sıcaklık ve nemi kontrollü bir odada olgunlaştırılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi, üç noktadan yüklemeli eğilme testi olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, perlit yüzey alanı oranı arttıkça eğilme dayanımı azalmaktadır. %0 perlit yüzey alanı oranına sahip numunelerin eğilme dayanımı en yüksek değere sahipken, %40 perlit yüzey alanı oranına sahip numunelerin eğilme dayanımı en düşük değere sahiptir. Bu sonuçlar, perlit yüzey alanı oranının artmasıyla numunelerin porozitesinin artmasına bağlanmıştır.

4.1.3 Geopolimer harç kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı

Kılcal geçirimsizlik deneyi sonucunda elde edilen veriler, Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre, kılcal su emme miktarı tüm karışımlar için 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm zamanları boyunca azalmıştır. %50 oranında GPA içeren C5 numunelerinde kılcal geçirimsizlik katsayısı en düşük değerlere sahip olup, 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için sırasıyla 0.81, 0.73, 0.60, 0.42 ve 0.25 olarak belirlenmiştir. Öte yandan, genleştirilmiş perlit agregası içermeyen C0 numunelerinde kılcal geçirimsizlik katsayısı en yüksek değerlere sahiptir ve 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçümler için sırasıyla 1.27, 1.06, 0.87, 0.61 ve 0.28 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde, GPA eklemenin kılcal geçirimsizlik katsayısını azalttığı görülmektedir.

Geopolimer harçlarda kum yerine GPA kullanılmasıyla kılcal geçirimsizlik katsayısının azalmasının birden fazla nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, porozite azalması nedeniyle kılcal geçirimsizlik katsayısı azalır. GPA hafif ve gözenekli bir malzemedir. Harç içerisinde kullanıldığında, agreganın gözenek yapısı daha az boşluk bırakır. Bu da poroziteyi azaltır ve suyun geçirgenliğini engeller. Dolayısıyla, GPA kullanımı kılcal geçirimsizlik katsayısını azaltır. İkinci olarak, GPA'nın daha iyi partikül dağılımı sağlaması etkindir. GPA, kumdan daha homojen bir partikül dağılımına sahiptir. Bu, harç içerisinde daha iyi bir dolgu ve paketleme sağlar. Daha iyi partikül dağılımı, suyun geçişini engeller ve kılcal geçirimsizlik katsayısını azaltır. Üçüncü olarak, GPA ve geopolimer harç matrisi arasında kimyasal bağlar oluşması da kılcal geçirimsizlik katsayısını azaltır. GPA, geopolimer harç matrisiyle kimyasal bağlar oluşturur. Bu kimyasal bağlar, agrega ve matris arasında daha sıkı bir bağlantı sağlar ve suyun geçişini engeller. Son olarak, GPA'nın hidrofobik özellikleri de kılcal geçirimsizlik katsayısının azalmasına katkıda bulunur. GPA, doğal olarak hidrofobik bir yapıya sahiptir. Bu, suyun agrega yüzeyine bağlanma eğilimini azaltır ve su geçişini engeller. Dolayısıyla, GPA kullanımı kılcal geçirimsizlik katsayısını azaltır. Genel olarak, GPA'nın kullanılması, harç içerisinde daha az boşluk bırakır, daha iyi bir partikül dağılımı sağlar, kimyasal bağlar oluşturur ve hidrofobik özelliklere sahiptir. Bu faktörler bir araya geldiğinde, kılcal geçirimsizlik katsayısının azalmasına ve suyun geçirgenliğinin azalmasına yol açmıştır.

Bir örnek olarak, El-Naggar ve Mesbah, (2021) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma verilebilir. Bu çalışmada, GPA kullanılarak hazırlanan geopolimer harçlarının kılcal geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Deneyler farklı perlit agregası oranlarına sahip harçlar için yapılmıştır. Kılcal geçirimsizlik deneyleri sonucunda elde edilen veriler, perlit agregası oranının artmasıyla birlikte kılcal geçirimsizlik değerlerinin azaldığını göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, GPA kullanımının, geopolimer harçların kılcal geçirimsizlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve bu nedenle bu tür malzemelerin su geçirimsizlik özelliklerinin artırılmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

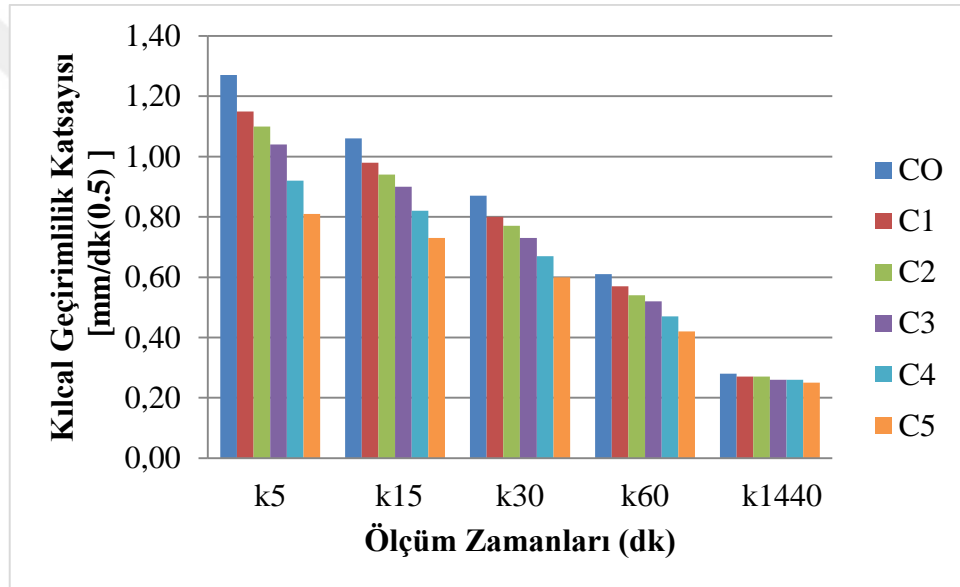
Geopolimer harçlarda GPA kullanımının kılcal geçirimsizlik özellikleri üzerine etkisini inceleyen bir çalışma, Shah vd., (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, farklı oranlarda GPA içeren (%0, 10, 20 ve 30) geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Kılcal geçirimsizlik özellikleri, su emme testleri ve darbe penetrasyon testleri kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, GPA katkısı ile geopolimer harçların kılcal geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirildiği tespit edilmiştir. Yüzde 30 GPA içeren harç numunesinin kılcal geçirimsizlik katsayısının en düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışma, kılcal geçirimsizlik özelliklerinin sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir faktör olduğunu göstermiştir.

Eskandari ve Shekarchi, (2015) tarafından yapılan çalışmada, farklı oranlarda GPA ilavesinin geopolimer harçların kılcal geçirimsizliği üzerine etkisi incelenmiştir. Deneyde kullanılan malzemeler, farklı oranlarda GPA ilave edilen dört farklı geopolimer harç karışımıdır. Harçların kılcal geçirimsizlik deneyleri, ASTM C1585 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kılcal geçirimsizlik katsayısı olarak ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, GPA ilavesinin kılcal geçirimsizlik katsayısını azalttığını göstermiştir. GPA oranı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı azalmaktadır. En düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı, %50 GPA içeren harçta elde edilmiştir. Bu sonuçlar, GPA ilavesinin geopolimer harçların su geçirimsizliğini arttırdığını göstermektedir.

Naggar vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada kılcal geçirimsizlik deneyinde kullanılan malzemeler şunlardır: MK, NaOH, Na₂SiO₃, sülfürik asit, NaCl ve GPA. Deneyde, çimento bazlı malzemelere göre daha düşük kılcal geçirimsizlik değerleri gösteren ve dolayısıyla daha iyi su direnci özellikleri sergileyen geopolimer malzemelerin kullanımı incelenmiştir. Deneyde, farklı oranlarda GPA (ağırlıkça 0%, 10%, 20%, 30%, ve 40%) içeren 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlar, NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri kullanılarak hazırlanan alkali aktivatör solüsyonu ile aktive edilmiştir. Hazırlanan numuneler 28 gün boyunca sıcaklık kontrollü odada bekletilmiştir. Kılcal geçirimsizlik deneyinde numuneler, sodyum klorür çözeltisi içerisinde bekletilerek 56 gün süresince su alımı ölçülmüştür. Sonuçlar, GPA oranının artmasıyla birlikte kılcal geçirimsizlik değerlerinde azalma olduğunu göstermiştir. %40 oranında GPA içeren numuneler, diğer numunelere göre en düşük kılcal geçirimsizlik değerlerine sahip olmuştur. Bu sonuçlar, GPA geopolimer malzemelerin su direnci özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir.

Çizelge 4.2: Geopolimer harç kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri

Karışım Adı	Kılcal geçirimsizlik katsayısı (mm/dk(0,5))				
	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
C0	1.27	1.06	0.87	0.61	0.28
C1	1.15	0.98	0.80	0.57	0.27
C2	1.10	0.94	0.77	0.54	0.27
C3	1.04	0.90	0.73	0.52	0.26
C4	0.92	0.82	0.67	0.47	0.26
C5	0.81	0.73	0.60	0.42	0.25



Şekil 4.3: Geopolimer harç kontrol numunelerinin zamana bağlı kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri

4.1.4 Kontrol numunelerinin görsel incelemeleri

Kür sürelerini tamamlayan kontrol numunelerinin 12 hafta sonundaki görünüşleri incelendiğinde, Şekil 4.4 ve 4.5'deki gibi olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerdeki GPA oranı arttıkça, numunelerin rengindeki değişim oranının az olduğu belirlenmiştir.

Geopolimer harçlarda kum yerine GPA oranının artmasıyla görsel görünümde çok az değişim olmasının nedeni, birçok faktöre bağlıdır. İlk faktör renk uyumudur. GPA genellikle beyaz veya açık renkte olduğu için, kum yerine kullanıldığında harcın renginde büyük bir değişiklik olmamıştır. Eğer GPA ve kum renkleri benzer veya uyumlu ise, görsel görünümdeki fark çok az olur. İkinci faktör miktar ve boyut dağılımıdır. GPA

kullanıldığında, miktarı ve boyut dağılımı da önemli bir faktördür. Eğer GPA kum yerine tamamen veya büyük ölçüde kullanılıyor ve benzer boyutlarda ise, görsel olarak büyük bir değişiklik olmayabilir. Son faktör ise diğer bileşenlerin etkisidir. Harç formülasyonunda kullanılan diğer bileşenler de görsel görünümü etkileyebilir. Örneğin, bağlayıcı malzeme, pigmentler veya katkı maddeleri gibi unsurlar harcın rengini ve görünümünü etkileyebilir. Bu nedenle, GPA oranının artması, ancak diğer bileşenlerin etkisiyle görsel değişikliklerin minimize edilmesine neden olabilir.



Şekil 4.4: Küp şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünümleri



Şekil 4.5: Prizma şeklindeki kontrol numunelerin 12 hafta sonundaki görünümleri

4.2 Sülfat Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Harç Numuneleri ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma, üretilen geopolimer harç numunelerinin sülfat etkisine karşı dirençlerini belirlemek ve sülfat ortamındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kür sürelerini tamamladıktan sonra 12 hafta boyunca %3 konsantrasyonundaki $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu süre zarfında numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık değişimleri ölçülmüş ve ayrıca görsel değişimleri incelenmiştir. Numunelerin basınç

dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerinin değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, sülfat ortamındaki direnç ve performansın değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri, kontrol numuneleriyle karşılaştırılarak numunelerin sülfat ortamındaki dayanıklılığını göstermektedir. Ayrıca, kılcal geçirimsizlik ve ağırlık değişimi ölçümleri, numunelerin su geçirgenliği özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır.

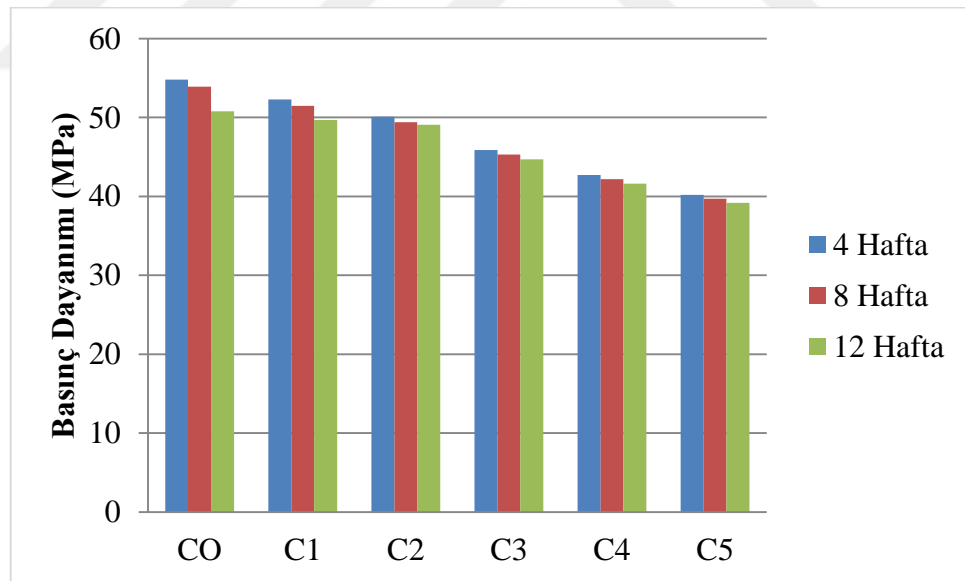
4.2.1 Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda basınç dayanımları ölçülerek incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri, Çizelge 4.4'te verilmiş ve Şekil 4.6-7'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerin basınç dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

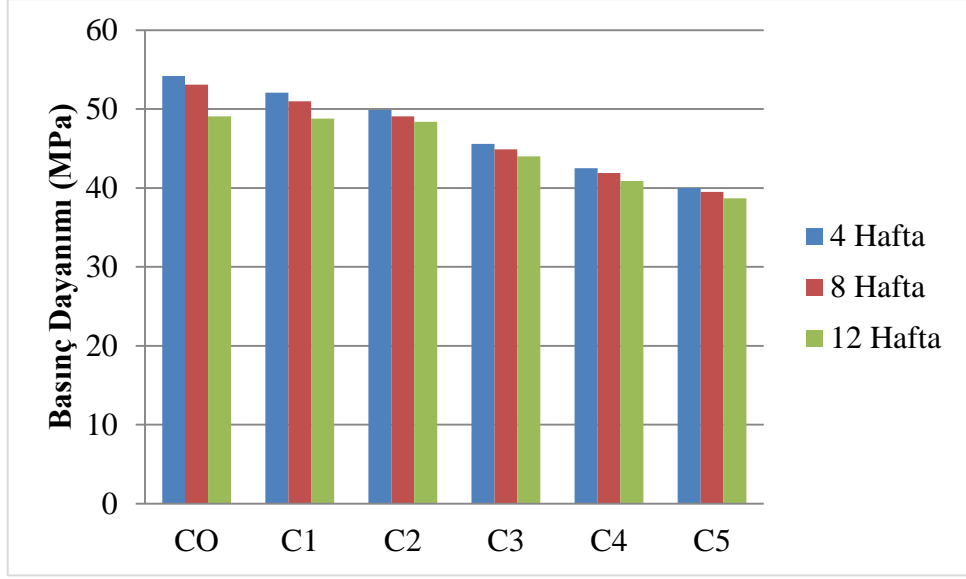
- %3 MgSO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0, C1, C2, C3, C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %6.5, %5.94, %3.28, %2.13, %1.61, %1.23 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %8.02, %7.37, %4.63, %3.41, %2.76, %2.46 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %13.31, %10.61, %5.21, %4.69, %4.15, %3.69 oranında azalmıştır.
- %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %7.51, %6.29, %3.67, %2.77, %2.07 ve %1.72 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %9.39, %8.27, %5.21, %4.26, %3.46 ve %2.95 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla %16.21, %12.23, %6.56, %6.18, %5.76 ve %4.91 oranında azalmıştır.

Çizelge 4.3: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, MPa

	Karışım	4 Hafta	8 Hafta	12 Hafta
%3 Na ₂ SO ₄	C0	54.2	53.1	49.1
	C1	52.1	51.0	48.8
	C2	49.9	49.1	48.4
	C3	45.6	44.9	44.0
	C4	42.5	41.9	40.9
	C5	40.0	39.5	38.7
%3 MgSO ₄	C0	54.8	53.9	50.8
	C1	52.3	51.5	49.7
	C2	50.1	49.4	49.1
	C3	45.9	45.3	44.7
	C4	42.7	42.2	41.6
	C5	40.2	39.7	39.2



Şekil 4.6: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri



Şekil 4.7: %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri

Geopolimer harçlarda kum yerine GPA kullanılması ve sülfatta bekletilmesi sonucunda basınç dayanımının azalmasının çeşitli nedenleri vardır. İlk neden, GPA'nın düşük mukavemetidir. GPA, doğal kumdan farklı bir yapıya ve daha düşük mukavemet özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, kumun yerine kullanılması, harcın genel mekanik dayanımını azaltmıştır. İkinci neden, geopolimerizasyon sürecinin etkilenmesidir. GPA, geopolimerizasyon sürecinde reaksiyonlara katılmayabilir veya daha az etkili olabilir. Bu durum, harcın moleküler yapısının tamamlanmasını ve mukavemetin gelişmesini engellemiştir. Üçüncü neden, sülfatın kimyasal etkisidir. Sülfatlar, geopolimer harçların kimyasal yapısını etkilemiştir. Özellikle kullanılan sülfatlar, sülfat iyonları ile reaksiyona girerek jel oluşumunu engellemiştir ve bu da harcın mukavemetini azaltmıştır. Ayrıca, sülfatlar, harcın içerdiği silikat bağlarını bozmuştur ve bu da dayanım kaybına neden olmuştur. Dördüncü neden, sülfatın su içeriğini artırmasıdır. Sülfat etkisi, harcın su tutma kapasitesini artırmıştır. Bu da harcın su/çimento oranını etkilemiştir ve bu durum da mukavemetin azalmasına yol açmıştır. Son neden, mikrostrukturel değişikliklerdir. Sülfat etkisi, harç içinde mikrostrukturel değişikliklere neden olmuştur. Örneğin, sülfatlar, agregaların yüzeyine etki ederek agregaların tutunma kabiliyetini azaltmıştır ve bu da mukavemet kaybına yol açmıştır. Bu faktörler, GPA kullanımıyla birlikte sülfatta bekletmenin basınç dayanımını azaltmasına katkıda bulunmuştur.

GPA kullanılan geopolimer harçlarda, sülfatta basınç dayanımının magnezyum sülfatta daha az düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun birkaç nedeni vardır.

İlk olarak, agreganın kimyasal ilişkisi etkilidir. GPA, reaktif alüminosilikat bileşikler içeren geopolimerik matrisle iyi bir uyum göstermiştir. Perlit agregası, matris içinde alkali aktivatörlerle birleşerek stabilizasyon sağlamıştır ve sülfat etkisine karşı dirençli bir yapı oluşturmuştur. Bu nedenle, GPA kullanılan geopolimer harçlarında magnezyum sülfat gibi agresif ortamlarda basınç dayanımının daha az düştüğü gözlemlenir. İkinci olarak, sülfat iyonu ile reaksiyon etkisi vardır. GPA, içerdiği poroz yapı sayesinde sülfat iyonlarını

absorbe edebilir veya tutabilir. Bu durum, sülfat iyonlarının matris içinde serbestçe hareket etmesini engeller ve sülfat etkisini sınırlar. Bu nedenle, GPA içeren geopolimer harçlarda magnezyum sülfatın basınç dayanımı üzerinde daha az etkisi olur. Son olarak, fiziksel etkileşimler etkilidir. GPA, matris içindeki gözeneklilik ve poroziteyi artırır. Bu durum, su emilimini azaltır ve sülfat etkisiyle oluşabilecek genişlemeyi engeller. Dolayısıyla, GPA kullanılan geopolimer harçlarda magnezyum sülfatın basınç dayanımı üzerinde daha az etkisi olur. Bu faktörlerin kombinasyonu, GPA kullanılan geopolimer harçların sülfat ortamlarında daha iyi bir performans sergilemesine ve basınç dayanımının magnezyum sülfatta daha az düşmesine neden olmuştur. Ancak, spesifik sonuçlar ve mekanizmalar, yapılan çalışmanın ayrıntılarına ve kullanılan malzemelere bağlı olarak değişebilir.

Atahan ve Arslan, (2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sülfat etkisi altında mineral katkılı harçların boyut değişimleri ve dayanım kayıpları, katkısız standart harçlarla karşılaştırmalı olarak 3 yıl boyunca incelenmiştir. Araştırmacılar, nano silika %2, %4 ve %6 oranlarında, mikro silika %6, %9 ve %12 oranlarında, UK %15, %30 ve %45 oranlarında ve YFC %20, %40 ve %60 oranlarında katkı kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre, 36 aylık süre sonunda kontrol karışımında gözlenen hasar göz önüne alındığında, sülfat etkisine karşı en etkili katkıların mikro silika ve nano silika olduğu belirtilmiştir. Nano silika katkısının düşük oranlarda bile boyut değişimlerini etkili bir şekilde sınırladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkının fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanabilir. Basınç dayanımı deneyi sonuçları, numunelerdeki dayanım kayıplarının boyut değişimlerinin %0,1 seviyesine ulaşmasıyla hız kazandığını göstermiştir. Ayrıca, XRD deneyleri mineral katkı oranının artmasıyla Ca(OH)_2 piklerinin azaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, mineral katkı ile Ca(OH)_2 arasındaki puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Ek olarak, kontrol numunelerinde katkı kullanılmamasına rağmen sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerde de Ca(OH)_2 miktarında azalma tespit edilmiştir. Etrenjit oluşumu gözlenmeyen bu numunelerde azalmanın muhtemelen alçı taşı oluşumu kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, mineral katkılı harçların sülfat etkisine karşı daha dayanıklı olduğunu ve mikro ve nano silika katkılarının etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, mineral katkıların puzolanik reaksiyonlar aracılığıyla çimentonun kimyasal bileşimini etkilediği ve Ca(OH)_2 miktarını azalttığı görülmüştür.

Demir vd., (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çimento ağırlığına göre farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) UK, taban külü ve YFC katkılarının üçlü kombinasyonu kullanılarak harçların sülfat direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her oran için katkılardan eşit miktarlar kullanılmıştır. Hazırlanan harç numuneleri 360 gün boyunca %10'luk sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş ve aynı süre boyunca kontrol amacıyla suda bekletilen numuneler de bulunmuştur. 360 günlük sürenin sonunda numuneler, TS EN 196-1 standardına göre basınç dayanımı testine ve ASTM C1012 standardına göre periyodik boyut değişimi deneylerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, %5 ve %10 üçlü katkı içeren numunelerin kontrol numunelerine göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Ancak %15 ve %20 üçlü katkı içeren numunelerin kontrol numunelerine göre daha düşük basınç dayanımı

sergilediği görülmüştür. Boyut değişimi deney sonuçları incelendiğinde ise %15 ve %20 üçlü katkı içeren numunelerin sülfat etkisine karşı en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, katkı kullanımının hidrasyon sonucu oluşan C-S-H jel miktarını artırdığı ve ilk etrenjit oluşumlarının 180. gün civarında başladığı belirtilmiştir. Bu bulgular, üçlü katkı kullanımının harçların sülfat direncini etkilediğini ve bazı oranlarda basınç dayanımını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, %15 ve %20 oranında üçlü katkı içeren numunelerin sülfat etkisine karşı daha iyi performans gösterdiği ve mikro yapıda olumlu değişikliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir.

Vuk vd., (2002) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, YFC, UK ve silis dumanı içeren kalkerli çimento ile hazırlanan harçların sülfat dirençleri incelenmiştir. Çalışmada, toplamda 10 farklı karışım oluşturulmuş ve bunların 5 tanesi %20 oranında kalker içerirken diğer 5 tanesi kalker içermemektedir. Tüm numuneler için su/çimento oranı 0.50 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan silindirik numuneler, 28 gün boyunca oda sıcaklığında ve %50-%70 bağıl nem aralığında depolanmıştır. Ardından bu numuneler, 5° C sıcaklıkta %2 derişimli magnezyum sülfat çözeltisine yerleştirilerek 5 ay süreyle bekletilmiştir. Numuneler, periyodik olarak çözelti içinde gözlemlenmiştir. Ayrıca, gravimetrik yöntem ve ıslak kimyasal analiz kullanılarak numunelerin sülfat absorpsiyonları da belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, 5 ay süreyle bekletilen numunelerin hasar durumları karşılaştırıldığında, kontrol karışımının mineral katkı içeren karışımlara göre daha düşük sülfat direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Silis dumanı içeren kalkerli çimento karışımları ve düşük C₃A içeren çimentolu karışımların diğer karışımlara göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sülfat absorpsiyon ölçümleri ise, 3 ve 5 aylık bekletme sürelerinin sonunda kalkerli çimento içeren karışımların kontrol karışımına göre daha fazla sülfat absorbe ettiğini ve silis dumanı içeren tüm karışımların sülfat absorpsiyonunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu bulgular, kalkerli çimento içeren karışımların sülfat direncini artırdığını ve silis dumanı katkısının sülfat absorpsiyonunu azaltıcı etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, mineral katkıların harçların sülfat direncini artırma potansiyeline sahip olduğunu ve uygun katkıların kullanımının yapıların sülfat etkisine karşı dayanıklılığını artırabileceğini göstermiştir.

Yu vd., (2015), çimento ağırlığının %40 ve %70 oranlarında YFC içeren harçların sodyum sülfat etkisi altındaki hasar mekanizmalarını incelemiştir. Çalışmalarında CEM I tipi çimento ve YFC kullanılmıştır. Harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Numuneler, 20 °C sıcaklıkta 90 gün boyunca suda bekletildikten sonra boşluk yapıları civa porozimetrisi deneyiyle belirlenmiştir. Ardından, numuneler 20 °C sıcaklıkta farklı sodyum sülfat çözeltisi konsantrasyonlarında (3 g/lt, 10 g/lt ve 30 g/lt) bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre, YFC içeren numunelerin hasar mekanizmalarının yüzeylerinde erozyon ve yüzey kaybı olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, katkısız çimento ile üretilen numunelerde hasar mekanizmasının genellikle genleşme kaynaklı olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, bu durumu kullanılan cürufun numunenin boşluk yapısını iyileştirmesine ve tampon etkisi oluşturmasına bağlamışlardır. Tampon etkisi, sülfat iyonlarının alümina fazları tarafından yakalanarak yüzeye yakın dar bir bölgede

tutulması olarak açıklanmıştır. Sülfat iyonları numuneye girdikçe ve alümina fazlarıyla reaksiyona girdikçe, boşluk çözeltisinin sülfat iyonu konsantrasyonunun arttığı ve iyon girişinin hızlandığı belirlenmiştir. Sülfat konsantrasyonu kritik seviyeye ulaştığında, etrenjit oluşumunun başladığı ve genleşmelere yol açtığı belirtilmiştir. Zamanla, bu genleşmeler numune yüzeyinde çatlaklara neden olmuş ve sülfatın iç bölgelere nüfuz etmesini kolaylaştırmıştır. Bu mekanizma, numunenin bütünlüğü bozuluncaya kadar hızını arttırarak devam etmiştir. Ayrıca araştırmacılar, sülfat konsantrasyonunun penetrasyon derinliğini arttırmadığını, ancak doyunlaşma sürecinde etrenjit oluşumu ile sonuçlandığını belirlemişlerdir.

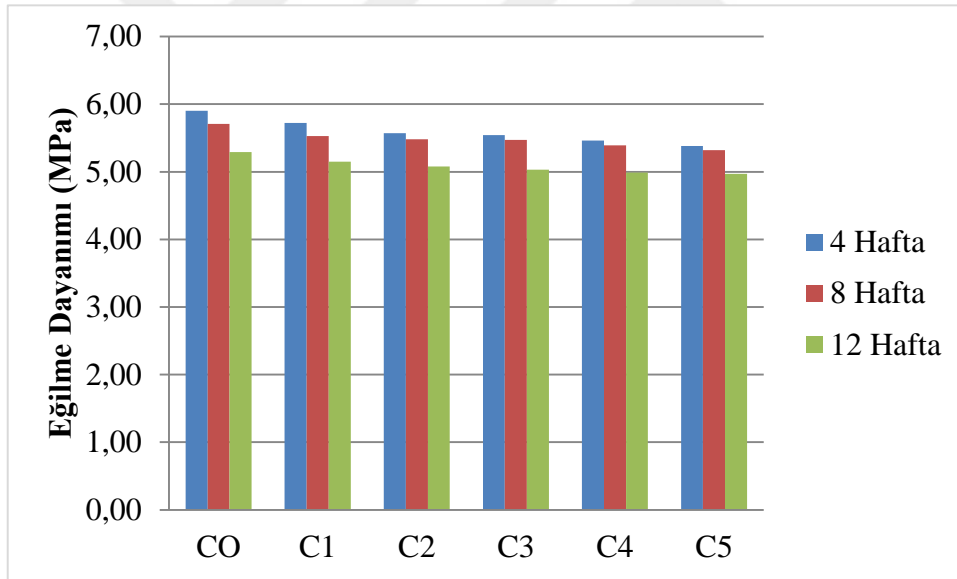
4.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları

Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler, 4, 8 ve 12 haftalık periyotlarda eğilme dayanımları ölçülerek incelenmiştir. Numunelerin eğilme dayanım değerleri, Çizelge 4.5'te verilmiş ve Şekil 4.8-9'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Sülfat çözeltisine 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanım değerleri, aynı yaşta olan ve laboratuvar ortamında bekletilen kontrol numunelerin eğilme dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında;

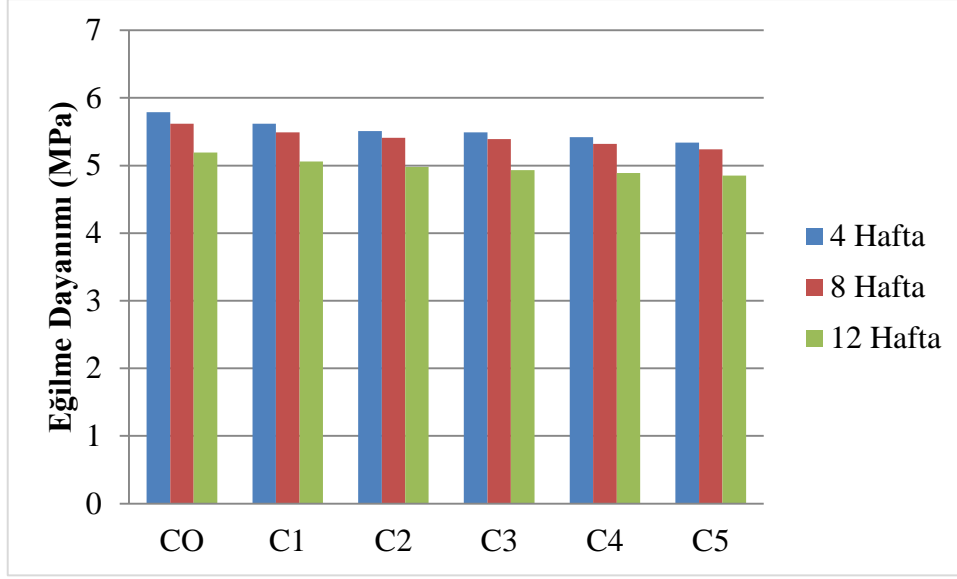
- %3 MgSO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %9,23, %8.33, %6.39, %3.99, %3.70, %3.24 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %12.15, %11.38, %7.90, %5.20, %4.94, %4.32 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %18.62, %17.47, %14.62, %12.82, %11.99, %10.61 oranında azalmıştır.
- %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numuneler için; 4 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %10.92, %9.94, %7.39, %4.85, %4.41 ve %3.96 oranında azalmıştır. 8 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %13.54, %12.02, %9.08, %6.59, %6.17 ve %5.76 oranında azalmıştır. 12 hafta maruz kalan numunelerde C0,C1,C2,C3,C4 ve C5 kodlu geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla %20.15, %18.91, %16.30, %14.56, %13.76 ve %12.77 oranında azalmıştır.

Çizelge 4.4: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin eğilme dayanım değerleri, MPa

	Karışım	4 Hafta	8 Hafta	12 Hafta
%3 Na₂SO₄	C0	5.79	5.62	5.19
	C1	5.62	5.49	5.06
	C2	5.51	5.41	4.98
	C3	5.49	5.39	4.93
	C4	5.42	5.32	4.89
	C5	5.34	5.24	4.85
%3 MgSO₄	C0	5.90	5.71	5.29
	C1	5.72	5.53	5.15
	C2	5.57	5.48	5.08
	C3	5.54	5.47	5.03
	C4	5.46	5.39	4.99
	C5	5.38	5.32	4.97



Şekil 4.8: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri



Şekil 4.9: %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerin eğilme dayanım değerleri

Geopolimer harçlarda kum yerine GPA kullanılması ve sülfatta bekletilmesiyle eğilme dayanımının azalmasının birkaç nedeni vardır. İlk neden, agrega özellikleridir. GPA, kumdan farklı özelliklere sahiptir. Perlit agregası daha hafif bir yapıya ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bu durum, harcın eğilme dayanımını etkilemiştir, çünkü agregalar harcın matriksinde yük taşıma yeteneğine katkıda bulunurlar. Daha hafif bir agreganın kullanılması, harcın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. İkinci neden, geçiş bölgeleridir. GPA ile harç arasındaki geçiş bölgeleri, kum ile olan geçiş bölgelerinden farklı olur. Geçiş bölgeleri, agregaların harç matriksine sağlam bir şekilde bağlanmasını sağlar. Eğer perlit agregası ile geçiş bölgeleri yeterince güçlü oluşturulamazsa, agregaların matris içinde tutunması zayıf olur ve bu da eğilme dayanımını azaltır. Son neden, sülfat etkisidir. Sülfatlar, geopolimer harçların dayanımını etkileyebilen agresif kimyasal bileşiklerdir. Sülfatlar, harç içindeki bazik kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girerek sülfatlı bileşikler oluştururlar. Bu reaksiyon sonucunda harç yapısının bozulması, çatlaklar ve hasarlar oluşması mümkündür. GPA içeren harçlar, sülfat etkisine karşı daha hassas olur ve eğilme dayanımı azalır. Bu nedenlerin yanı sıra, GPA ve sülfat etkisi arasındaki etkileşimler daha karmaşık olabilir ve başka faktörler de eğilme dayanımının azalmasına katkıda bulunabilir.

Ahmed vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçlarda sülfat etkisinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneylerde farklı bileşimlere sahip numuneler kullanılmış ve sülfat maruziyeti altında eğilme dayanımı değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçlarına göre, sülfat etkisiyle birlikte tüm numunelerin eğilme dayanımında azalma gözlenmiştir. Bu azalmanın sülfat etkisinin artmasıyla birlikte daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Yani, sülfat maruziyetinin süresi ve sülfat çözeltisinin etkisi arttıkça eğilme dayanımındaki azalma da artmıştır. Ancak, ilginç bir bulgu olarak, %50 portland çimentosu ve %50 geopolimer harç karışımından oluşan numunelerde diğer numunelere göre daha az eğilme dayanımı azalması tespit edilmiştir. Bu, geopolimer harcın sülfat etkisine karşı daha iyi bir dayanıklılık potansiyeline sahip olduğunu

göstermektedir. Çalışma ayrıca, geopolimer harçların genellikle portland çimentosu ile karıştırıldığında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu, sülfat etkisine karşı dayanıklılığın artmasında ve eğilme dayanımının korunmasında etkili bir strateji olarak görülebilir.

4.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizliği

Üretilen geopolimer harç numuneleri, %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta süreyle bekletildikten sonra kılcal geçirimsizlik deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiş olup, Şekil 4.10-15'te değişimler grafiksel olarak gösterilmiştir. İncelenen deney verilerine göre, her iki sülfat çözeltilisinde de bekletme süresi arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı artmıştır.

Ayrıca, her iki sülfat çözeltilisinde de GPA içeriği arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı azalmıştır. Örneğin, %0 GPA içeren C0 kodlu harç numunesi en yüksek kılcal geçirimsizlik katsayısı değerine sahipken, %50 GPA içeren C5 kodlu harç numunesi en düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı değerine sahiptir.

Ayrıca, %3 Na₂SO₄ çözeltilisinde bekletilen harç numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri, %3 MgSO₄ çözeltilisinde bekletilen harç numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayı değerlerinden daha yüksektir.

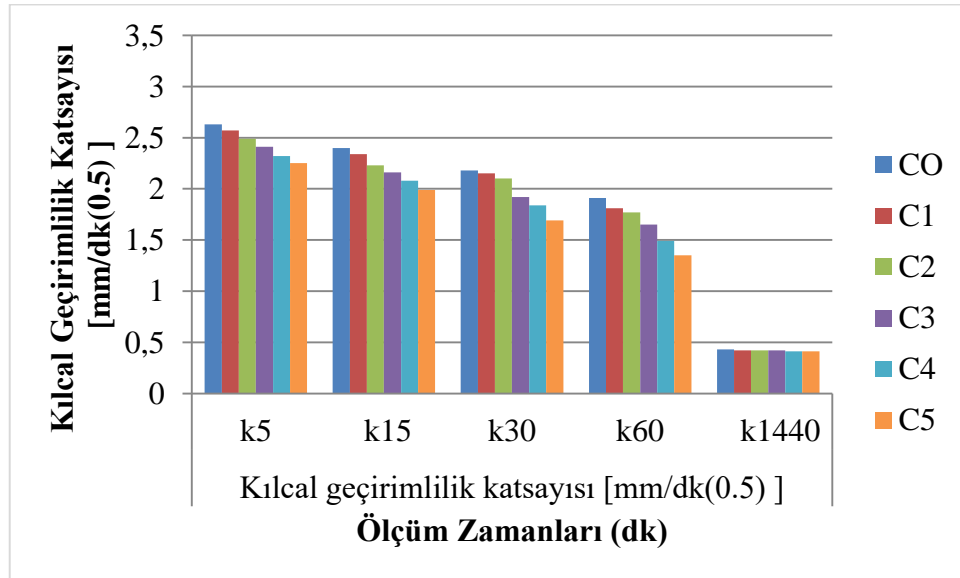
Deneyde ölçüm zamanı arttıkça birbirini takip eden zamanlarda ölçülen kılcal geçirimsizlik katsayı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Sülfat çözeltilerinde bekletilen geopolimer harç numuneleri, 28 gün kür edilen kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında kılcal geçirimsizlik katsayısı değerlerinde artma meydana gelmiştir. Bu durumun birkaç nedeni vardır. İlk olarak, GPA, doğal olarak gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözenekler, agreganın içerisinde hava veya su birikmesine neden olmuştur. Sülfat çözeltisi, bu gözenekler aracılığıyla harç içine nüfuz etmiştir ve su geçirgenliğini artırmıştır. Bu durum, kılcal geçirimsizlik katsayısının artmasına katkıda bulunmuştur. İkinci olarak, sülfat etkisi harcın kimyasal yapısını etkiler. Sülfatlar, harç içinde kimyasal reaksiyonlara girerek kristal oluşumunu tetiklemiştir. Bu kristaller, harç içindeki kapiler boşlukları tıkayarak suyun hareketini engellemiştir. Ancak, bu kristaller aynı zamanda harcın iç yapısında boşluklar ve çatlaklar oluşturur, bu da suyun geçirgenliğini artırır. Ayrıca, sülfatlar harcın içerdiği kimyasal bileşiklerle reaksiyona girer ve yeni bileşiklerin oluşmasına yol açar. Bu reaksiyonlar, harcın iç yapısını değiştirerek daha fazla gözenek oluşumuna ve suyun hareketini kolaylaştıran kanalların oluşmasına neden olmuştur. Bu faktörler bir araya geldiğinde, GPA kullanılan geopolimer harçlarda sülfat çözeltisiyle temasın kılcal geçirimsizlik katsayısını artırmasına neden olur. Ancak, bu durum spesifik bileşenlere, sülfat konsantrasyonuna ve diğer deney koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Çizelge 4.5: %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri

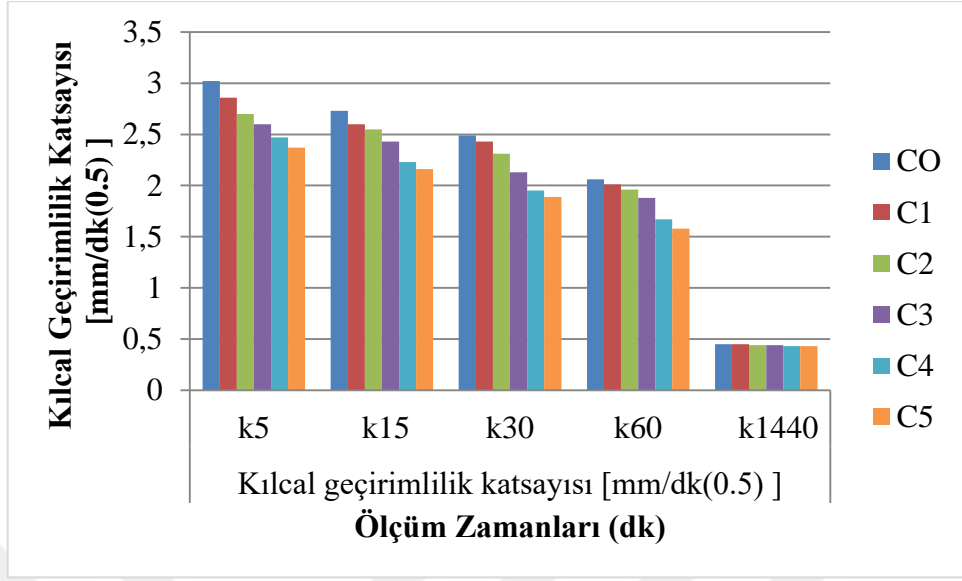
Kılcal geçirimsizlik katsayısı (mm/dk (0.5))							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k5	k15	k30	k60	k1440
%3 Na ₂ SO ₄	4 Hafta	C0	2.66	2.41	2.20	1.93	0.44
		C1	2.59	2.34	2.16	1.81	0.44
		C2	2.49	2.25	2.11	1.77	0.43
		C3	2.42	2.16	1.93	1.67	0.43
		C4	2.34	2.08	1.87	1.50	0.42
		C5	2.26	1.99	1.71	1.37	0.42
%3 Na ₂ SO ₄	8 Hafta	C0	3.03	2.73	2.51	2.07	0.46
		C1	2.86	2.61	2.45	2.03	0.45
		C2	2.73	2.56	2.33	1.96	0.45
		C3	2.61	2.43	2.15	1.89	0.44
		C4	2.48	2.25	1.95	1.70	0.44
		C5	2.38	2.19	1.89	1.60	0.43
%3 Na ₂ SO ₄	12 Hafta	C0	3.30	3.15	2.84	2.38	0.49
		C1	3.19	3.07	2.77	2.26	0.48
		C2	3.03	2.79	2.55	2.08	0.47
		C3	2.93	2.73	2.43	1.95	0.46
		C4	2.86	2.51	2.19	1.73	0.46
		C5	2.77	2.37	2.07	1.65	0.45

Çizelge 4.6: %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri

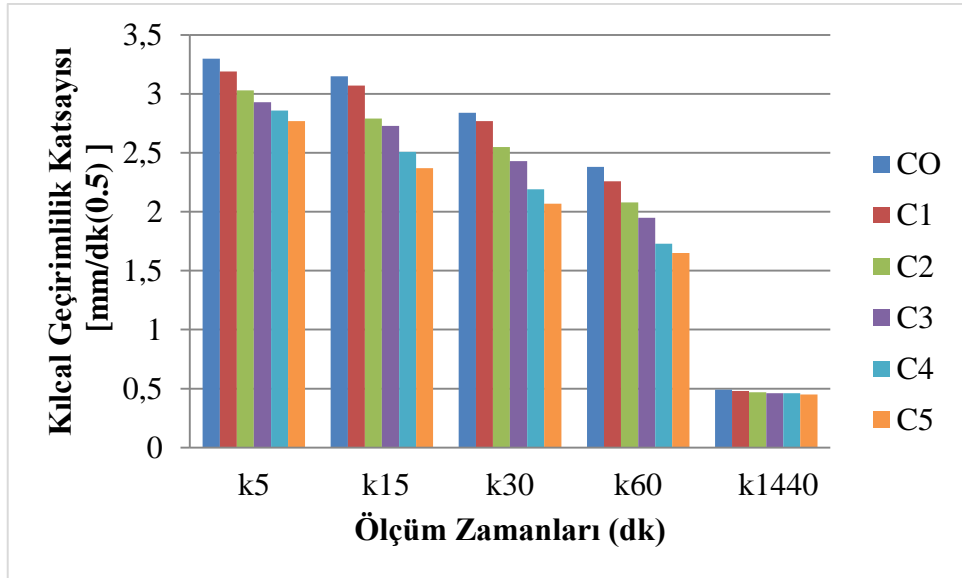
Kılcal geçirimlilik katsayısı (mm/dk (0.5))							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k5	k15	k30	k60	k1440
%3 MgSO ₄	4 Hafta	C0	2.63	2.40	2.18	1.91	0.43
		C1	2.57	2.34	2.15	1.81	0.42
		C2	2.49	2.23	2.10	1.77	0.42
		C3	2.41	2.16	1.92	1.65	0.42
		C4	2.32	2.08	1.84	1.49	0.41
		C5	2.25	1.99	1.69	1.35	0.41
%3 MgSO ₄	8 Hafta	C0	3.02	2.73	2.49	2.06	0.45
		C1	2.86	2.60	2.43	2.01	0.45
		C2	2.70	2.55	2.31	1.96	0.44
		C3	2.60	2.43	2.13	1.88	0.44
		C4	2.47	2.23	1.95	1.67	0.43
		C5	2.37	2.16	1.89	1.58	0.43
%3 MgSO ₄	12 Hafta	C0	3.28	3.14	2.81	2.36	0.48
		C1	3.18	3.05	2.76	2.25	0.47
		C2	3.01	2.79	2.54	2.05	0.46
		C3	2.93	2.72	2.41	1.94	0.46
		C4	2.85	2.50	2.18	1.72	0.45
		C5	2.76	2.35	2.04	1.63	0.45



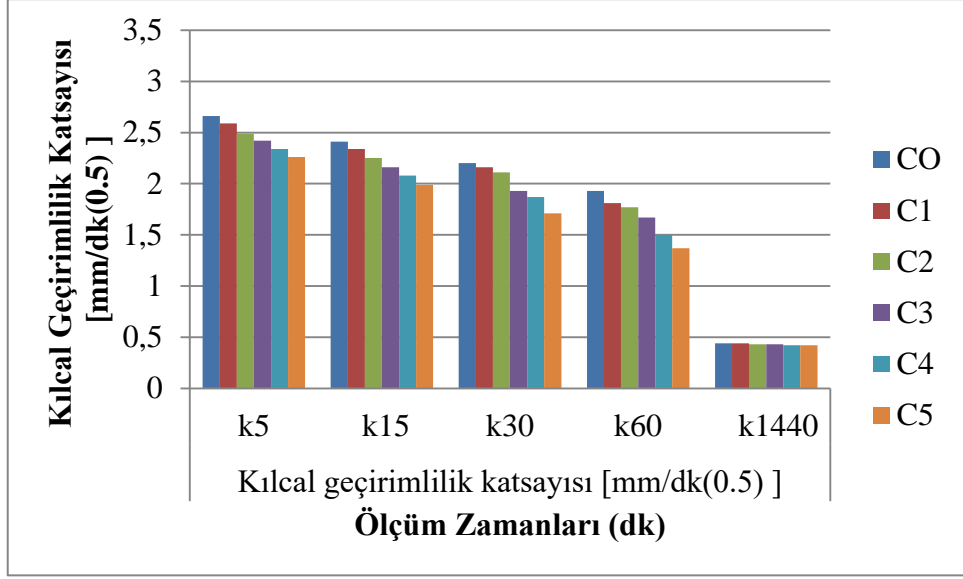
Şekil 4.10 : %3 MgSO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



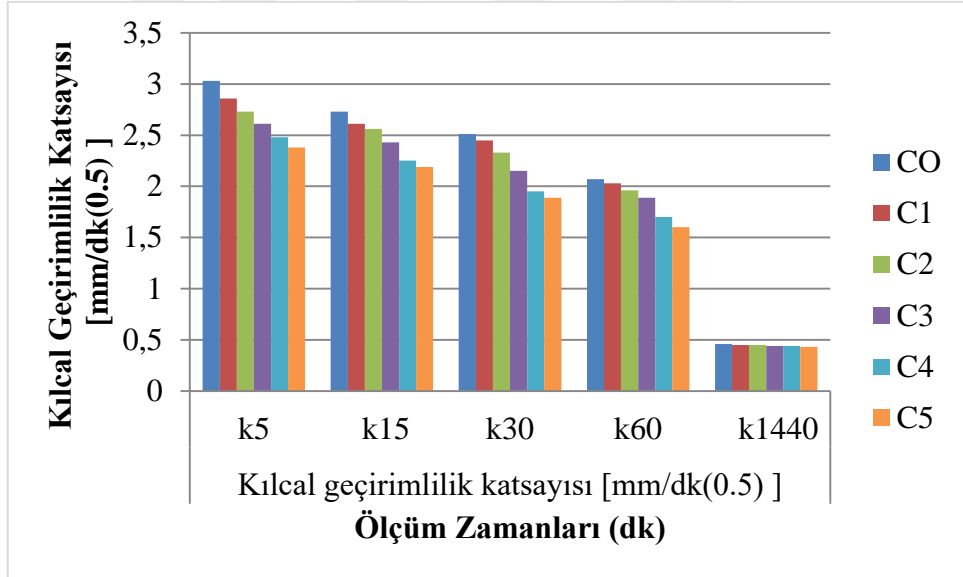
Şekil 4.11 : %3 MgSO₄ çözeltilisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



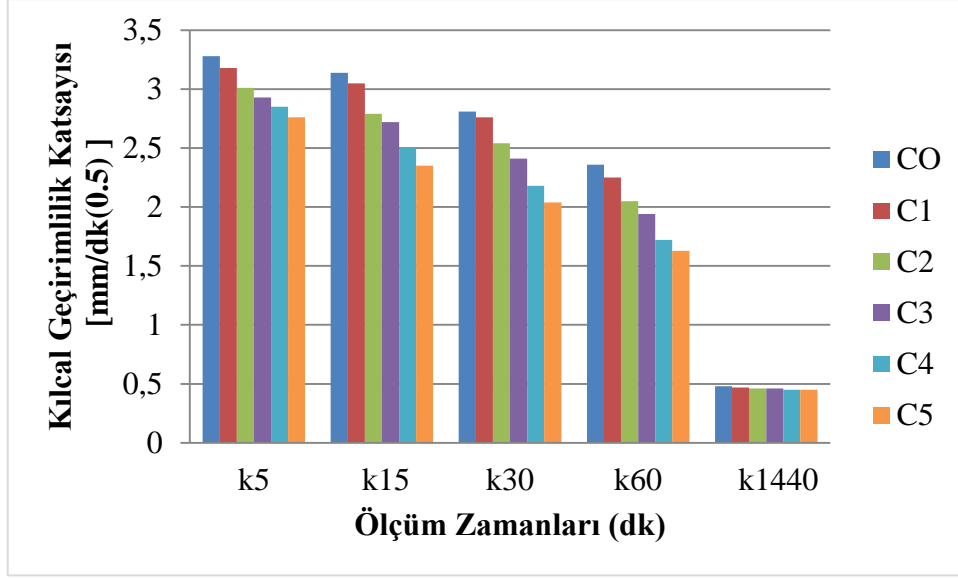
Şekil 4.12 : %3 MgSO₄ çözeltilisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim



Şekil 4.13 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



Şekil 4.14 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim



Şekil 4.15 : %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim

Liu vd., (2020) yaptığı çalışmada, sülfat etkisinin geopolimer harçların kılcal geçirgenliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, farklı oranlarda sülfat içeren sulu çözeltilere batırılmış olan geopolimer harç numuneleri kullanılmıştır. Harç numuneleri, bir basınç değerine kadar yüklenerek kılcal geçirimsizlik deneyi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçlarına göre, sülfat etkisiyle numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayılarında artış gözlemlenmiştir. Bu artışın, sülfat iyonlarının harç yapısındaki kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jel yapısını bozarak poroziteyi arttırması sonucu olduğu belirtilmiştir.

Mohamed vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı sülfat konsantrasyonlarına maruz kalan geopolimer harç numunelerinin kılcal geçirimsizliği ölçülmüştür. Ayrıca, GPA'nın kılcal geçirimsizlik üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çalışmada, 4 farklı harç formülasyonu kullanılmıştır: kontrol harcı, %10 GPA ilavesi yapılan harç, %20 GPA ilavesi yapılan harç ve %30 GPA ilavesi yapılan harç. Bu numuneler, 2, 4 ve 6 ay boyunca sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Sonuçlar, kontrol harcının 2, 4 ve 6 aylık sülfat maruziyeti sonrasında sırasıyla $0,54 \times 10^{-12}$, $0,67 \times 10^{-12}$ ve $0,92 \times 10^{-12}$ m²/sn olan kılcal geçirimsizlik değerlerinde önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Ancak, GPA ilavesi yapılan harç numunelerinde bu azalma daha az belirgindir. Çalışma, GPA'nın sülfat maruziyeti ile birlikte kılcal geçirimsizlik üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada etkili olabileceğini göstermiştir.

Li vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçların sülfat etkisi altındaki kılcal geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Deneyler, geopolimer harç numunelerinin farklı sülfat konsantrasyonlarına maruz bırakıldığı laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, sülfat etkisi altındaki geopolimer harçların kılcal geçirimsizlik katsayıları artmıştır. Ayrıca, farklı sülfat konsantrasyonlarına maruz kalan harç numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayıları arasında önemli farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

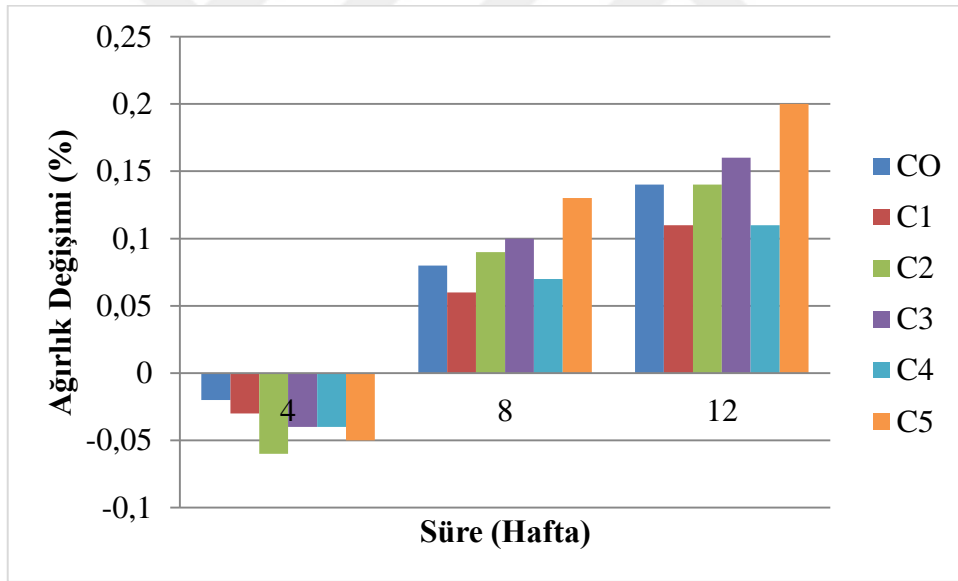
4.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

Üretilen geopolimer harç numuneleri, sülfat çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca bekletilerek ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan harç numunelerinin ağırlık değişim verileri, Çizelge 4.8'de sunulmuş ve bu değişimler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ sülfat etkisine 12 hafta boyunca maruz kalan geopolimer harç numunelerinde ağırlık artışı gözlenmiştir. Bu durumun bazı nedenleri şunlardır. İlk olarak, perlit agregasının sülfatla etkileşimidir. Sülfat çözeltileri, perlit agregasındaki bileşenlerle reaksiyona girebilir. Bu reaksiyonlar, sülfat iyonları ile perlit içerisindeki mineraller arasında kimyasal değişimlere yol açabilir. Bu değişimler, agreganın ağırlığında artışa neden olabilir. Son olarak, sülfat etkisiyle agreganın su emme kapasitesinin artmasıdır. Sülfat çözeltilerine maruz kalan perlit agregası, su emme kapasitesini artırabilir. Bu durum, agreganın suyu tutma yeteneğini artırarak ağırlık artışına neden olabilir. Bu faktörlerin birleşimi, perlit agregası kullanılan geopolimer harçlarda sülfatın ağırlık artışına neden olmasına katkıda bulunabilir. Ancak, spesifik sonuçlar ve mekanizmalar, yapılan çalışmanın ayrıntılarına ve kullanılan malzemelere bağlı olarak değişebilir.

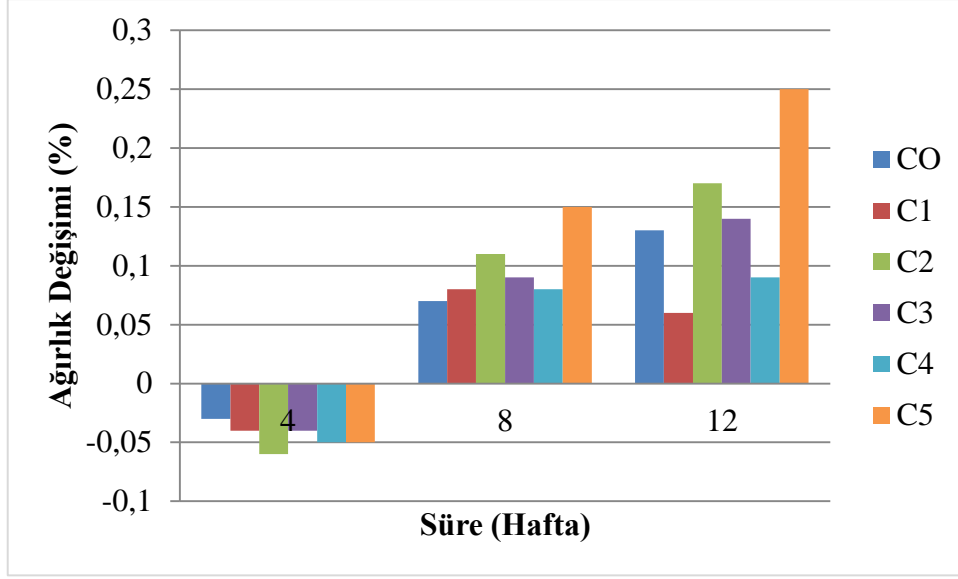
GPA kullanılan geopolimer harçlarda sülfatta ağırlık değişiminin farklı sürelerde farklı bir şekilde ilerlemesi, çeşitli faktörlerden kaynaklanır. İlk faktör sülfat iyonlarının etkisidir. Sülfat etkisi, GPA içeren geopolimer harçların yapısal özelliklerini değiştirmiştir. Başlangıçta, sülfat iyonları matrise nüfuz ederek çeşitli reaksiyonlar başlatır ve ağırlık kaybına neden olur. Bu durum 4 haftalık süre içinde belirgin bir şekilde görülmüştür. İkinci faktör hidrasyon ve reaksiyon süreçleridir. GPA, geopolimer matrisi içinde hidrasyon ve reaksiyon süreçlerini etkiler. Bu süreçler, zamanla matrisin yapısının olgunlaşmasına ve güçlenmesine yol açar. 8 ve 12 haftalık sürelerde, geopolimer matrisi daha fazla zaman ve fırsat bulur ve sülfat etkisine karşı daha dirençli bir yapı geliştirir. Bu nedenle, sülfat ağırlık değişimi 8 ve 12 haftalık sürelerde artmıştır. Son faktör ise kararlılık ve uzun süreli etkidir. Sülfat etkisi zamanla gelişir ve uzun süreli etkileri ortaya çıkarır. 4 haftalık süre içinde ağırlık kaybı gözlenebilirken, 8 ve 12 haftalık sürelerde sülfat iyonlarının reaksiyonları sonucunda matrisin içinde stabilite oluşturmuştur. Bu stabilite, sülfat iyonlarının daha az etkili olmasını sağlamıştır ve ağırlık artışına neden olmuştur. Bu faktörler, sülfat ağırlık değişiminin farklı sürelerde farklı şekillerde ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Ancak, kesin nedenleri belirlemek için daha fazla araştırma ve deney yapılması gerekmektedir. Ayrıca, çalışmanın spesifik ayrıntıları ve kullanılan malzemeler de sonuçları etkileyebilir.

Çizelge 4.7: Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Çözelti	Karışımlar	Süre (Hafta)		
		4	8	12
%3 MgSO ₄	C0	-0.02	0.08	0.14
	C1	-0.03	0.06	0.11
	C2	-0.06	0.09	0.14
	C3	-0.04	0.10	0.16
	C4	-0.04	0.07	0.11
	C5	-0.05	0.13	0.20
%5 Na ₂ SO ₄	C0	-0.03	0.07	0.13
	C1	-0.04	0.08	0.06
	C2	-0.06	0.11	0.17
	C3	-0.04	0.09	0.14
	C4	-0.05	0.08	0.09
	C5	-0.05	0.15	0.25



Şekil 4.16: %3 MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin ağırlık değişimleri



Şekil 4.17: %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri

Elyamany vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçlar, %10 magnezyum sülfat çözeltisine kadar 48 hafta süresince maruz bırakılmıştır. Geopolimer harçların 36 haftaya kadar magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalması sonucunda ağırlıklarında bir artış tespit edilmiştir. Ancak, 36 haftadan sonra ağırlıklarında neredeyse hiçbir değişiklik gözlenmemiştir. Araştırmacılar, 36 haftaya kadar olan ağırlık artışının muhtemelen boşluk oranı ve etkilenen yüzey veya gözenekler içinde oluşan beyaz tortulardan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Dener, (2022) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında, alkali-aktif YFC bağlayıcılı kendinde yerleşen harçların dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Çalışmada pomza agregası olarak kullanılmış ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Portland çimentosu, YFC ile %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında değiştirilerek harç numuneleri üretilmiştir. Araştırma sonucunda, %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde 6 ay boyunca bekletilen harç numunelerinin ağırlıklarında artış olduğu kontrol numunelerine göre tespit edilmiştir.

Parthiban ve Mohan, (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, granüle YFC bağlayıcı olarak kullanılarak %0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında GDA içeren karışımlar hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresinin ardından numuneler, %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde 90 gün boyunca bekletilmiş ve ağırlık kaybı incelenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık kaybının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Artan GDA oranına göre, sodyum sülfata maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı sırasıyla %0.68, 0.90, 1.63, 2.25 ve 3.13 olarak belirlenmiştir. Magnezyum sülfata maruz kalan numunelerde ise bu oranlar %2.37, 3.00, 4.10, 4.96 ve 6.34 olarak ölçülmüştür. Ancak, normal portland çimentosu ile yapılan referans numunesiyle karşılaştırıldığında bir iyileşme görülmüştür. Referans numunesindeki ağırlık

kaybının sodyum sülfatta %2-2.5 arasında, magnezyum sülfatta ise %6-6.5 arasında olduğu tespit edilmiştir.

4.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim

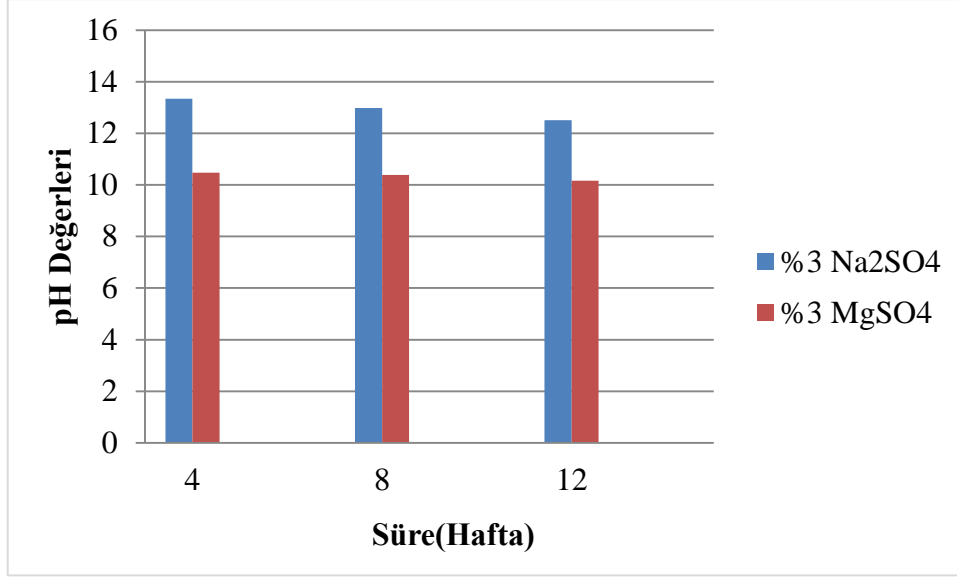
Geopolimer harç numuneleri, sülfat etkisini incelemek amacıyla 4, 8 ve 12 hafta boyunca %3 konsantrasyonlu Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinde bekletilmiştir. Her dört hafta sonunda sülfat çözeltilerinin pH değerleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, Çizelge 4.9'da sunulmuş ve pH değerlerindeki değişim Şekil 4.18'de grafik olarak gösterilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, her iki sülfat çözeltisinde de bekletme süresi arttıkça pH değerlerinde azalma gözlenmiştir. %3 konsantrasyonlu Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinin pH değerleri, her dört haftada bir ölçülerek sırasıyla 8.87 ve 8.35 olarak belirlenmiştir. Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişime bakıldığında, %3 Na₂SO₄ çözeltisinin pH değerlerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %50.39, %46.34 ve %41.04 oranında artış olduğu, %3 MgSO₄ çözeltisinde ise 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %25.51, %24.43 ve %21.68 oranında artış olduğu görülmüştür.

Bu artışın nedenleri ise şöyledir. Geopolimer harçlarda magnezyum ve sodyum sülfatların etkisiyle pH değerinin artmasının temel nedeni, sülfat iyonlarının hidroliz reaksiyonlarıdır. Magnezyum ve sodyum sülfatlar su ile etkileşime girdiğinde sülfat iyonları (SO₄²⁻) ve hidrojen iyonları (H⁺) oluştururlar. Bu reaksiyon sonucunda hidrojen iyonlarının konsantrasyonu artar ve çözelti asidik hale gelmiştir. Asidik bir ortamda, hidrojen iyonları (H⁺) çözeltide arttıkça pH değeri düşer. Ancak geopolimer harçlarda magnezyum ve sodyum sülfat etkisiyle pH değerinin artması, sülfat iyonlarının hidroliz reaksiyonlarına ek olarak başka faktörlerin etkisini de içerir. Geopolimer harç içindeki alüminyum ve silikon bileşenleri, sülfat iyonlarıyla etkileşime girerek sülfatlarla kimyasal reaksiyonlara neden olmuştur. Bu reaksiyonlar sonucunda sülfatlar hidratlar oluşturur ve hidratlanmış sülfatlar çözeltinin pH'nı artırmıştır. Bu hidratlar, hidrojen iyonlarının yoğunluğunu azaltarak çözeltinin asidik özelliğini hafifletir ve pH değerini artırmıştır. Bu şekilde, magnezyum ve sodyum sülfatların etkisiyle geopolimer harçlarda pH değerinin artmasının temel nedeni, sülfat iyonlarının hidroliz reaksiyonları ve oluşan hidratların çözeltinin pH'sini etkilemesidir. Ancak, spesifik duruma ve harç bileşimine bağlı olarak diğer faktörlerin etkisi de söz konusu olabilir.

Çizelge 4.8: %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi

Çözelti	Çözelti pH değeri	pH değerleri değişimi (pH)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%3 Na ₂ SO ₄	8.87	13.34	12.98	12.51
%3 MgSO ₄	8.35	10.48	10.39	10.16



Şekil 4.18: %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi

Thokchom vd., (2010) çalışmasında, UK bazlı geopolimer harç numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisindeki performansını incelemek amacıyla deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 24 hafta boyunca %10 MgSO₄ çözeltisinin pH değerleri üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlar, pH değerlerinin ilk üç hafta boyunca hızla arttığını ve daha sonra önemli bir artış olmadığını hatta durduğunu göstermiştir.

Alcamand vd., (2018) çalışmasında, MK ve cüruf bazlı geopolimer harçların sülfat dayanıklılığını araştırmışlardır. Harçların üretiminde sodyum hidroksit kullanılarak alkali aktivatör olarak görev yapmış, agregalar ise nehir kumu olmuştur. Numuneler, 28 gün boyunca oda koşullarında kür işlemine tabi tutulmuş ve ardından ağırlıkça %5 MgSO₄ çözeltisine 180 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Çalışmada sülfat çözeltisinin pH değişimine odaklanılmıştır. pH değerlerinin ilk 30 gün içinde %31.29 arttığı ve daha sonra magnezyum sülfat çözeltisinin testin sonuna kadar (180 gün) yenilenmediği için çözeltinin pH değerinin genellikle sabit kaldığı belirtilmiştir.

4.2.6. Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin görsel olarak incelenmesi sonucunda, numunelerin yüzeyinde sınırlı miktarda çatlak veya bozulma görüldüğü tespit edilmiştir. Numuneler, 12 hafta boyunca sülfat çözeltilerine maruz kaldığından, Şekil 4.19-22'te gösterildiği gibi görünümde değişiklikler meydana gelmiştir.

Geopolimer harçlar, magnezyum ve sodyum sülfat gibi agresif kimyasal çözeltilere maruz kaldığında, numunelerin yüzeyinde çatlaklar veya bozulmalar görülmesinin birkaç nedeni vardır. İlk neden sülfat iyonlarının etkisidir. Magnezyum ve sodyum sülfat çözeltileri, içerdikleri sülfat iyonları nedeniyle agresif bir ortam oluşturur. Bu iyonlar, geopolimer matrisindeki kimyasal bağları bozar ve numunenin yüzeyinde çatlaklara neden olmuştur.

İkinci neden sodyum ve magnezyum iyonlarının reaksiyonlarıdır. Sodyum ve magnezyum iyonları, harçtaki bazı bileşenlerle reaksiyona girerek kristal oluşumuna yol açar. Bu kristaller, numunenin içinde ve yüzeyinde birikerek çatlaklara veya bozulmalara neden olmuştur. Üçüncü neden hidrasyon denge problemleridir. Sülfat çözeltilerine maruz kaldığında, geopolimer harçlarda hidrasyon dengesi bozulur. Bu, su ve diğer bileşenlerin çözeltiden numuneye doğru hareket etmesine ve kimyasal reaksiyonların hızlanmasına yol açar. Bu hızlı reaksiyonlar, numunenin iç yapısında gerilmelere neden olarak çatlakların oluşmasına katkıda bulunmuştur. Son neden ise kristal genişlemesidir. Sülfat çözeltilerine maruz kalan numunelerde, çatlak ve bozulmaların bir nedeni de kristal genişlemesidir. Sülfat iyonları, hidratlı halde iken kristalleşirken hacimlerini genişletir. Bu genişleme, numunenin içinde mekanik gerilmelere ve yüzeyde çatlaklara yol açabilir. Bu nedenlerden dolayı, magnezyum ve sodyum sülfat çözeltilerine maruz kalan geopolimer harç numuneleri, görsel olarak sınırlı miktarda çatlak veya bozulma göstermiştir. Harç bileşimine ve sülfat çözeltisinin özelliklerine bağlı olarak, bu değişikliklerin şiddeti ve yaygınlığı değişebilir.



Şekil 4.19: %3 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp numunelerin görünüşleri



Şekil 4.20: %3 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen prizma numunelerin görünüşleri



Şekil 4.21: %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen küp numunelerin görünüşleri



Şekil 4.22: %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen prizma numunelerin görünüşleri

Tuncan vd., (2017) tarafından yaptığı çalışmada geopolimer harçların görsel görünümü üzerine sülfatın etkisi araştırılmıştır. Deneylerde farklı oranlarda magnezyum sülfat katkısı kullanılarak hazırlanan numunelerin görünüşleri incelenmiştir. Sonuç olarak, magnezyum sülfatın harçların yüzeyinde beyaz lekeler oluşumuna neden olduğu ve bu etkinin sülfat konsantrasyonu arttıkça arttığı belirlenmiştir.

Provis vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada geopolimer harçların sülfat ile karşılaştığında görsel görünüme nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Deney sonuçları, sülfatın geopolimer pastaların renginde ve yüzeyinde değişikliklere neden olduğunu göstermiştir. Sülfatın, pastaların gri tonunu artırdığı ve yüzeylerinde beyaz lekeler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, sülfatın geopolimer harçların estetik görünümünü olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir.

Thokchom vd., (2010) tarafından gerçekleştirilen deneysel bir araştırmada, magnezyum sülfat çözeltisi ortamında UK bazlı geopolimer harç numunelerinin performansı incelenmiştir. Numuneler, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisinin bir karışımıyla etkinleştirilmiş ve düşük kalsiyumlu UK kullanılarak üretilmiş ve termal olarak kür edilmiştir. Numuneler, %10 ağırlıkça magnezyum sülfat çözeltisiyle 24 haftaya kadar ıslatılmıştır. Çalışma süresince geopolimer harçların görünüşleri incelenmiştir. Araştırma

sonucunda, numune yüzeyinde başlangıçta yumuşak olan ve daha sonra sert kristallere dönüşen beyaz tortuların oluştuğu belirtilmiştir.

Sata vd., (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, katkısız PÇ harçlarda geopolimer harçlara göre daha fazla bozulma olduğu belirtilmiştir. Bu bozulmanın nedeni, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum monosülfoalüminatların sülfatla reaksiyona girmesinden kaynaklanan dayanım kaybı, genleşme ve çatlaklara yol açan etrenjit ve alçıtaşına dönüşmeleridir. Magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalan harçlarda, katyon değişimi sonucunda yüzeyde beyaz CaSO₄ tortuları görülmüştür. Geopolimere eklenen cüruf miktarı ve alkali aktivatör oranının artmasıyla tortu miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi içeren harç numunelerinde, aktif mineral elementlerinin harçlardan yıkanıp uzaklaşması nedeniyle harçların içyapısının bozulduğu belirtilmiştir (Yusuf, 2015).



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kumun yerine hacimce %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında GPA kullanılarak geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen geopolimer harç numuneleri, ağırlıkça %3 konsantrasyonlu Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta süresince bekletilmiştir. Harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık değişimi ve kılcal geçirimsizlik katsayısı gibi özellikleri incelenmiştir. Ayrıca görsel değişimler de gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 28 gün kür edilen kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca sülfat çözeltilerinin 4, 8 ve 12 hafta süresince pH değerlerindeki değişim de incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, GPA miktarı arttıkça azalmıştır. En yüksek basınç dayanımı 58.6 MPa değer ile C0 karışımından elde edilirken, en düşük basınç dayanımı 40.7 MPa değer ile C5 karışımından elde edilmiştir.
- Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı, GPA miktarı arttıkça azalmıştır. En yüksek eğilme dayanımı 6.5 MPa değer ile C0 karışımından elde edilirken, en düşük eğilme dayanımı 5.56 MPa değer ile C5 karışımından elde edilmiştir.
- %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin bekletilme süresi arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. 12 hafta sonunda %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanım değeri 49.1 MPa olarak C0 karışımında elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri 38.7 MPa olarak C5 karışımında elde edilmiştir. 12 hafta sonunda %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde ise en yüksek basınç dayanım değeri 50.8 MPa olarak C0 karışımında elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri 39.2 MPa olarak C5 karışımında elde edilmiştir. %3 Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının, %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha az olduğu gözlenmiştir.
- %3 Na₂SO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin bekletilme süresi arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır. 12 hafta sonunda %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde en yüksek eğilme dayanım değeri C0 karışımında 5.19 MPa olarak elde edilirken, en düşük eğilme dayanım değeri C5 karışımında 4.85 MPa olarak elde edilmiştir. 12 hafta sonunda %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde ise en yüksek eğilme dayanım değeri C0 karışımında 5.29 MPa olarak elde edilirken, en düşük eğilme dayanım değeri C5 karışımında 4.97 MPa olarak elde edilmiştir. %3 Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin eğilme dayanımlarının, %3 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından az olduğu görülmüştür.
- Sülfat etkisi sonrası harç numunelerinde ağırlık artışı olmuştur. Ancak ağırlık artışı düzenli olmamıştır.
- 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayısı, GPA oranı arttıkça ve deney ölçüm zamanı arttıkça azalmıştır.

- Sulfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları kontrol numunelerine göre azalmıştır. Ancak sulfat etkisinde bekletilme süresi arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayıları artmıştır.
- Sulfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim 12 hafta boyunca ölçülmüştür. %3 Na₂SO₄ çözeltisinin pH değerlerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %50.39, %46.34 ve %41.04 oranlarında artış olduğu, %3 MgSO₄ çözeltisinde ise 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %25.51, %24.43 ve %21.68 oranında artış olduğu görülmüştür.
- %3 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta süresince bekletilen numunelerin görünümünde herhangi bir değişim olmazken, %3 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin yüzeylerinde beyazımsı lekeler ve renk değişimi olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlara dayanarak, aşağıdaki öneriler ele alınabilir:

Bu çalışmada uygulanan yöntemler ve elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, geopolimer harçların kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını araştırmak ve durabilitesini arttırmak için farklı yöntemler önerilebilir. Silis modülü, s/b oranı, alkali türü ve miktarları, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve kür koşulları değiştirilerek üretilen geopolimer harçların dayanıklılıkları karşılaştırılabilir. Kimyasal çözeltilerin farklı konsantrasyonlarında geopolimer numunelerin nasıl etkilendiği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Abdalqader, A. F., Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2016). Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113, 66-75.

Abdel-Gawwad, H. A., & Abo-El-Enain, S. A. (2016). A novel method to produce dry geopolymer cement powder. *HBRC journal*, 12(1), 13-24.

Abdollahnejad, Z., Pacheco-Torgal, F., Aguiar, J. Á., & Jesus, C. (2015). Durability performance of fly ash based one-part geopolymer mortars. *Key Engineering Materials*, 634, 113-120.

Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 70, 453-459.

Adak, D., Sarkar, M., Maiti, M., Tamang, A., Mandal, S., & Chattopadhyay, B. (2015). Anti-microbial efficiency of nano silver–silica modified geopolymer mortar for eco-friendly green construction technology. *RSC advances*, 5(79), 64037-64045.

Adam, A. A., & Horianto, X. X. X. (2014). The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar. *Procedia engineering*, 95, 410-414.

Afshari, H., Ashraf, S., Ebadi, A. G., Jalali, S., Abbaspour, H., Daliri, M. S., & Toudar, S. R. (2011). Study of the effects irrigation water sanity and pH on production and relative absorption of some elements nutrient by the tomato plant. *American Journal of Applied Sciences*, 8(8), 766-772.

Agrawal, S., & Dhawan, N. (2021). Evaluation of red mud as a polymetallic source—A review. *Minerals Engineering*, 171, 107084.

Ahmed, E. R., Ibrahim, A. B., El-Hakim, A. H., & Hussein, H. M. (2020). Mechanical and Durability Properties of Geopolymer Mortar Exposed to Sodium Sulfate Solution. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 8.

Al-Akhras, N. M. (2006). Durability of metaokolin concrete to sulfate attack. *Cement and concrete research*, 36(9), 1727-1734.

Alcamand, H. A., Borges, P. H., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018). The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037-5044.

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A., & Meikle, S. (2016). Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. *Construction and Building Materials*, 120, 198-211.

American Standards for Testing Materials, Standard specification for lightweight aggregates for insulating concrete. (2009). ASTM International: West Conshohocken, PA.

Angulo-Ramírez, D. E., de Gutiérrez, R. M., & Puertas, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. *Construction and Building Materials*, 140, 119-128.

Arellano-Aguilar, R., Burciaga-Diaz, O., Gorokhovskiy, A., & Escalante-García, J. I. (2014). Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: Effects of the chemical composition, temperature and aggregate: binder ratio. *Construction and Building Materials*, 50, 642-648.

AS-2350.14 (2006). *Methods of testing portland, blended and masonry cements.* Method 14: Length change of cement mortars exposed to sulfate solution.

ASTM C 1064 (2011). *Standard Test Methods for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-cement concrete.* ASTM, International, West Conshohocken, PA,

ASTM C 1437-07 (2008). *Standard Test Methods for Flow of Hydraulic Cement Mortar.* ASTM, International, West Conshohocken, PA,

ASTM C 807-13 (2008). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.* ASTM, International, West Conshohocken, PA,

ASTM, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. (2014). ASTM International, West Conshohocken.

Atahan, H. N., & Arslan, K. M. (2016). Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives. *Sustainable cities and society*, 22, 40-48.

Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., & Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23(1), 548-555.

Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O. K. A. N., Bilim, C., İlkentapar, S. E. R. H. A. N., & Luga, E. (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and building materials*, 96, 673-678.

Austin, G. S., & Barker, J. M. (1998). Commercial perlite deposits of New Mexico and North America. New Mexico geological society guidebook. In *49th field conference, Las Cruces Country, II* (pp. 271-8).

Baig, M. A. (2012). Acoustic Ceiling Tiles Made with Paper Processing Waste. *Acoustical Society of America Journal*, 132(3), 1871.

- Bakharev, T. (2005).** Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), 1233-1246.
- Ban, C. C., Ken, P. W., & Ramli, M. (2017).** Effect of sodium silicate and curing regime on properties of load bearing geopolymer mortar block. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), 04016237.
- Ban, C. C., Ken, P. W., & Ramli, M. (2017).** Mechanical and durability performance of novel self-activating geopolymer mortars. *Procedia engineering*, 171, 564-571.
- Barker, J.M. & Santini, K. (2006).** Industrial Minerals and Rocks- Commodities, Markets, and Uses J.E. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker, and S.T. Krukowski, Editors. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*, p. 685-702.
- Barth-Wirsching, U., Höller, H., Klammer, D., & Konrad, B. (1993).** Synthetic zeolites formed from expanded perlite: type, formation conditions and properties. *Mineralogy and petrology*, 48(2-4), 275-294.
- Bashar, I. I., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Islam, A. (2014).** The effect of variation of molarity of alkali activator and fine aggregate content on the compressive strength of the fly ash: palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Bashar, I. I., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Islam, A. (2016).** Development of sustainable geopolymer mortar using industrial waste materials. *Materials Today: Proceedings*, 3(2), 125-129.
- Bates, R. L. (1960).** Geology of the industrial rocks and minerals. (*No Title*).
- Bayat, A., Hassani, A., & Yousefi, A. A. (2018).** Effects of red mud on the properties of fresh and hardened alkali-activated slag paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 167, 775-790.
- Berge, B. (2009).** *The ecology of building materials*. Routledge.
- Bhowmick, A., & Ghosh, S. (2012).** Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of fly ash based geopolymer mortar. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 3(1), 168-177.
- Bhutta, A., Farooq, M., Zanotti, C., & Banthia, N. (2017).** Pull-out behavior of different fibers in geopolymer mortars: effects of alkaline solution concentration and curing. *Materials and Structures*, 50, 1-13.
- Brykov, A., Anisimova, A., Rozenkova, N., Hadi, M., & Mokeev, M. (2015).** The Impact of Aluminum-and Iron-Bearing Admixtures on the Resistance of Portland Cement Mortars to Alkali-Silica Reaction and Sulfate Attack. *Materials Sciences and Applications*, 6(06), 539.

BS EN 480-2 (2006). Admixtures for Concrete, Mortar and Grout, Test methods, Determination of Setting Time,

Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., & Lukić, I. (2017). Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, 152, 614-631.

Bullerjahn, F., & Mehringskötter, M. (2021). Synthetic granulated blast furnace-like slag from bauxite residue smelting and its use in multi-component Portland composite cement. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129667.

Burriesci, N., Arcoraci, C., Antonucci, P., & Polizzotti, G. (1985). Physico-chemical characterization of perlite of various origins. *Materials Letters*, 3(3), 103-110.

Chakir, A., Bessiere, J., Kacemi, K. E., & Marouf, B. (2002). A comparative study of the removal of trivalent chromium from aqueous solutions by bentonite and expanded perlite. *Journal of hazardous materials*, 95(1-2), 29-46.

Cheah, C. B., Liew, J. J., Le Ping, K. K., Siddique, R., & Tangchirapat, W. (2022). Properties of ternary blended cement containing ground granulated blast furnace slag and ground coal bottom ash. *Construction and Building Materials*, 315, 125249.

Chen, X., Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., Wang, J., & Zhou, M. (2019). Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions. *Journal of cleaner production*, 207, 789-800.

Cheremisinoff, P. N. (2019). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. Routledge.

Chi, M. (2016). Synthesis and characterization of mortars with circulating fluidized bed combustion fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 123, 565-573.

Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3), 224-229.

Ciullo, P. A. (1996). *Industrial minerals and their uses: a handbook and formulary*. William Andrew.

Colangelo, F., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferone, C., & Cioffi, R. (2013). Preparation and characterization of new geopolymer-epoxy resin hybrid mortars. *Materials*, 6(7), 2989-3006.

Cooke, R. U., & Smalley, I. J. (1968). Salt weathering in deserts. *Nature*, 220(5173), 1226-1227.

Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782-2797.

- Dai, J., Wang, Q., Xie, C., Xue, Y., Duan, Y., & Cui, X. (2019).** The effect of fineness on the hydration activity index of ground granulated blast furnace slag. *Materials*, 12(18), 2984.
- Davidovits, J. (1991).** Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2016).** Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72, 235-245.
- Demir, I., Güzelküçük, S., & Sevim, Ö. (2018).** Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3), 275-283.
- Dener, M. (2022).** Alkali-Aktif Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Hafif Agregata ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özellikleri (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Denning, P. S. (1962).** *U.S. Patent No. 3,042,578*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- DePorter, C. D., Dawson, S. D., Battaglioli, M. V., & Sandoval, C. P. (2000).** *U.S. Patent No. 6,149,831*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Detphan, S., & Chindaprasirt, P. (2009).** Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6), 720-726.
- Dhmees, A. S., Khaleel, N. M., & Mahmoud, S. A. (2018).** Synthesis of silica nanoparticles from blast furnace slag as cost-effective adsorbent for efficient azo-dye removal. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1113-1121.
- Doğan, M., & Alkan, M. (2003).** Removal of methyl violet from aqueous solution by perlite. *Journal of colloid and interface science*, 267(1), 32-41.
- Doğan, M., & Alkan, M. (2004).** Some physicochemical properties of perlite as an adsorbent.
- Dündar, H. (2006).** Farklı Soğutma Hızlarında Soğutulan Çelikhane Cüruflarının Öğütme Parametrelerinin İncelenmesi. *Hacettepe Üniversitesi*.
- El-Naggar, M. R., & Mesbah, H. A. (2021).** Effect of expanded perlite aggregate on the properties of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 288, 123045.
- El-Sayed, H. A., Abo, E. E. S., Khater, H. M., & Hasanein, S. A. (2011).** Resistance of alkali activated water-cooled slag geopolymer to sulphate attack. *Ceramics-Silikáty*, 55(2), 153-160.

Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., & Elshaboury, A. M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111-127.

Engin, Y. (2015). Yüksek Fırın Cürüflu Çimento Üretimi Özellikleri ve Etkisi.

Englert, M. H. (1999). U.S. Patent No. 5,964,934. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741 s.

Eskandari, M.R., & Shekarchi, M. (2015). The effect of expanded perlite aggregate on the physical, thermal and mechanical properties of geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 99, 175-182.

Folliard K. J., Sandberg P. (1994). Mechanisms of Concrete Deterioration. *Special Publication*, 145(50), 933-946.

Font, A., Soriano, L., de Moraes Pinheiro, S. M., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Payá, J. (2020). Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118568.

Fornasiero, R. B. (2001). Phytotoxic effects of fluorides. *Plant Science*, 161(5), 979-985.

Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., & De Haan, Y. M. (1989). The reaction of fly ash in concrete a critical examination. *Cement and concrete research*, 19(2), 235-246.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*, 34(9), 1489-1498.

Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2017). Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1407-1417.

Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124, 105826.

Gijbels, K., Iacobescu, R. I., Pontikes, Y., Vandevenne, N., Schreurs, S., & Schroeyers, W. (2018). Radon immobilization potential of alkali-activated materials containing ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, 184, 68-75.

Gontmakher, V., & Pevzner, E. (2002). U.S. Patent No. 6,368,527. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Görhan, G., & Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part b: engineering*, 58, 371-377.

- Guades, E. J. (2016).** Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio. *Construction and Building Materials*, 127, 484-493.
- Gunning, D. F. (1994).** *Perlite Market Study for British Columbia*. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Mineral Resources Division, Geological Survey Branch.
- Guo, X., & Pan, X. (2020).** Effects of steel slag on mechanical properties and mechanism of fly ash-based geopolymer. *Journal of materials in civil engineering*, 32(2), 04019348.
- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G. L., & Winnefeld, F. (2011).** Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 955-963.
- Hao, X., Liu, X., Zhang, Z., Zhang, W., Lu, Y., Wang, Y., & Yang, T. (2022).** In-depth insight into the cementitious synergistic effect of steel slag and red mud on the properties of composite cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 52, 104449.
- Haq, E. U., Padmanabhan, S. K., Zubair, M., Ali, L., & Licciulli, A. (2016).** Intumescence behaviour of bottom ash based geopolymer mortar through microwave irradiation—As affected by alkali activation. *Construction and Building Materials*, 126, 951-956.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004).** On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Hartshorn, S. A., Sharp, J. H., & Swamy, R. N. (2002).** The thaumasite form of sulfate attack in Portland-limestone cement mortars stored in magnesium sulfate solution. *Cement and Concrete Composites*, 24(3-4), 351-359.
- Haynes, H., O'Neill, R., Neff, M., & Mehta, P. K. (2008).** Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulfate environment. *ACI Materials Journal*, 105(1), 35.
- He, D., Gao, C., Pan, J., & Xu, A. (2018).** Preparation of glass-ceramics with diopside as the main crystalline phase from low and medium titanium-bearing blast furnace slag. *Ceramics International*, 44(2), 1384-1393.
- Helmy, A. I. I. (2016).** Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 110, 54-64.
- Herskovitch, D., & Lin, I. J. (1996).** Upgrading of raw perlite by a dry magnetic technique. *Magnetic and Electrical Separation*, 7(3), 145-161.
- Hu, X., & Poon, C. S. (2022).** Chloride-related steel corrosion initiation in cement paste prepared with the incorporation of blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104349.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., & Hussin, M. W. (2016).** Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars

containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 125, 1229-1240.

IEA (2021). Global cement production in the Net Zero Scenario, 2010-2030.

Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Bashar, I. I. (2014). The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 833-841.

Ismail, M., Yusuf, T. O., Noruzman, A. H., & Hassan, I. O. (2013). Early strength characteristics of palm oil fuel ash and metakaolin blended geopolymer mortar. *Advanced materials research*, 690, 1045-1048.

Izard, D. G., & Englert, M. H. (1993). *U.S. Patent No. 5,250,153*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Izzat, A. M., Al Bakri, A. M. M., Kamarudin, H., Moga, L. M., Ruzaidi, G. C. M., Faheem, M. T. M., & Sandu, A. V. (2013). Microstructural analysis of geopolymer and ordinary Portland cement mortar exposed to sulfuric acid. *Mater. Plast*, 50(3), 171-174.

Jackson, F. L. (1986). Processing perlite for use in insulation applications. *Mining Eng.*, 38, 40-45.

Jiang, L., Li, C., Wang, C., Xu, N., & Chu, H. (2018). Utilization of flue gas desulfurization gypsum as an activation agent for high-volume slag concrete. *Journal of Cleaner Production*, 205, 589-598.

Johnstone, S. J., & Johnstone, M. G. (1961). *Minerals for the chemical and allied industries*. Wiley.

Jumrat, S., Chatveera, B., & Rattanadecho, P. (2011). Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(2), 242-248.

Kabir, S. M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Sharmin, A., & Islam, A. (2015). Influence of molarity and chemical composition on the development of compressive strength in POFA based geopolymer mortar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.

Kadey, F.L., Jr. (1983). Perlite, in *Industrial Minerals and Rocks*, S.J. Lefond, Editor. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, p. 997-1015.

Kendall, T. (2000). NO SIGN OF THE BUBBLE BURSTING- PERLITE USES & MARKETS. *Industrial Minerals*, (393), 51-53.

Keskey, W., Camisa, J.D., and Meath, K.R. (1992). Composite board, containing certain latex binder compositions, C. The Dow Chemical, Editor. EP.

- Khairul, M. A., Zanganeh, J., & Moghtaderi, B. (2019).** The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resources, Conservation and Recycling*, *141*, 483-498.
- Khatib, J. M., & Wild, S. (1998).** Sulphate resistance of metakaolin mortar. *Cement and concrete research*, *28*(1), 83-92.
- King, E. G., Todd, S. S., & Kelley, K. K. (1948).** *Perlite: Thermal data and energy required for expansion* (Vol. 4394). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Koralegedara, N. H., Pinto, P. X., Dionysiou, D. D., & Al-Abed, S. R. (2019).** Recent advances in flue gas desulfurization gypsum processes and applications—A review. *Journal of environmental management*, *251*, 109572.
- Kotwal, A. R., Kim, Y. J., Hu, J., & Sriraman, V. (2015).** Characterization and early age physical properties of ambient cured geopolymer mortar based on class C fly ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *9*(1), 35-43.
- Kouamo, H. T., Mbey, J. A., Elimbi, A., Diffo, B. K., & Njopwouo, D. (2013).** Synthesis of volcanic ash-based geopolymer mortars by fusion method: Effects of adding metakaolin to fused volcanic ash. *Ceramics International*, *39*(2), 1613-1621.
- Koukouras, N. K. (1997).** Rare earth elements in volcanic glass: A case study from Trachilas perlite deposit, Greece. *Chem. Erde*, *57*, 351-362.
- Kumar, M. L., & Revathi, V. (2016).** Metakaolin bottom ash blend geopolymer mortar—a feasibility study. *Construction and Building Materials*, *114*, 1-5.
- Kürklü, G. (2016).** The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar. *Composites part b: engineering*, *92*, 9-18.
- Lee, N. K., Kim, E. M., & Lee, H. K. (2016).** Mechanical properties and setting characteristics of geopolymer mortar using styrene-butadiene (SB) latex. *Construction and Building Materials*, *113*, 264-272.
- Lemougna, P. N., Wang, K. T., Tang, Q., & Cui, X. M. (2017).** Study on the development of inorganic polymers from red mud and slag system: Application in mortar and lightweight materials. *Construction and Building Materials*, *156*, 486-495.
- Li, J., Zhang, J., Wu, X., Zhao, J., Wu, M., & Huan, W. (2020).** A nanocomposite paper comprising calcium silicate hydrate nanosheets and cellulose nanofibers for high-performance water purification. *RSC advances*, *10*(51), 30304-30313.
- Li, Q., Chen, C., Shen, L., & Zhai, J. (2013).** Manufacturing F-fly ash based geopolymer mortars using CFBC bottom ash as fine aggregates. *J. Chem. Soc. Pak*, *35*(2), 314-319.
- Li, X., Liu, S. F., & Wang, P. M. (2009).** Flexural behavior of geopolymer concrete mortar modified by re-dispersible polymer emulsion powder. *J. Build. Mater*, *12*(2), 205-208.

- Li, X., Ma, X., Zhang, S., & Zheng, E. (2013).** Mechanical properties and microstructure of class C fly ash-based geopolymer paste and mortar. *Materials*, 6(4), 1485-1495.
- Li, X., Wang, Z., & Jiao, Z. (2013).** Influence of curing on the strength development of calcium-containing geopolymer mortar. *Materials*, 6(11), 5069-5076.
- Li, Y., Qiao, C., & Ni, W. (2020).** Green concrete with ground granulated blast-furnace slag activated by desulfurization gypsum and electric arc furnace reducing slag. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122212.
- Li, Z., Wang, P., Zhang, Z., & Wu, S. (2019).** Effect of sulfate attack on the capillary properties of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 197, 332-338.
- Li, Z., You, H., Gao, Y., Wang, C., & Zhang, J. (2021).** Effect of ultrafine red mud on the workability and microstructure of blast furnace slag-red mud based geopolymeric grouts. *Powder Technology*, 392, 610-618.
- Lim, J. Y., Kang, Y. G., Sohn, K. M., Kim, P. J., & Galgo, S. J. C. (2022).** Creating new value of blast furnace slag as soil amendment to mitigate methane emission and improve rice cropping environments. *Science of The Total Environment*, 806, 150961.
- Liu, J., Sun, Y., Li, L., & Song, Y. (2020).** Effects of sulfate solution on capillary permeability and pore structure of alkali-activated slag cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 250, 118884.
- Liu, S., Liu, W., Jiao, F., Qin, W., & Yang, C. (2021).** Production and resource utilization of flue gas desulfurized gypsum in China-A review. *Environmental Pollution*, 288, 117799.
- Liu, X., Han, Y., He, F., Gao, P., & Yuan, S. (2021).** Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud-A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126542.
- Liu, X., Zhang, N., Sun, H., Zhang, J., & Li, L. (2011).** Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue—Red mud. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 847-853.
- Liu, Y., Zhang, Z., Hou, G., & Yan, P. (2021).** Preparation of sustainable and green cement-based composite binders with high-volume steel slag powder and ultrafine blast furnace slag powder. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125133.
- Liu, Z., Deng, D., & De Schutter, G. (2014).** Does concrete suffer sulfate salt weathering? *Construction and Building Materials*, 66, 692-701.
- Luo, Z., Hao, Y., Mu, Y., Tang, C., & Liu, X. (2022).** Solidification/stabilization of red mud with natural radionuclides in granular blast furnace slag based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 316, 125916.

- Lura, P., Bentz, D. P., Lange, D. A., Kovler, K., & Bentur, A. (2004, March).** Pumice aggregates for internal water curing. In *Proceedings of International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur* (pp. 22-24). RILEM Publications SARL Evanston.
- Ma, Y., Vora, H.D., & Provis, J.L. (2016).** Effect of sulfate on the stability of fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Research*, 88, 100-113.
- Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016).** Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia engineering*, 148, 710-717.
- Mallikarjuna Rao, G., & Gunneswara Rao, T. D. (2015).** Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian journal for science and engineering*, 40, 3067-3074.
- Mermerdaş, K., Algin, Z., Oleiwi, S. M., & Nassani, D. E. (2017).** Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolymer mortars by response surface method. *Construction and Building Materials*, 139, 159-171.
- Mijarsh, M. J. A., Johari, M. M., & Ahmad, Z. A. (2015).** Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. *Cement and Concrete Composites*, 60, 65-81.
- Mijarsh, M. J. A., Johari, M. M., & Ahmad, Z. A. (2015).** Effect of delay time and Na₂SiO₃ concentrations on compressive strength development of geopolymer mortar synthesized from TPOFA. *Construction and Building Materials*, 86, 64-74.
- Min, C., Shi, Y., & Liu, Z. (2021).** Properties of cemented phosphogypsum (PG) backfill in case of partially substitution of composite Portland cement by ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 305, 124786.
- Moavenzadeh, F., & Cahn, R. W. (Eds.). (1990).** *Concise encyclopedia of building and construction materials* (Vol. 4). MIT Press.
- Mohamed, A.M.O., Shaaban, I.G., & AbdElrahman, M. (2021).** Performance of Geopolymer Mortar Exposed to Sodium Sulfate Solution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3), 04021014.
- Narayanan, A., & Shanmugasundaram, P. (2017).** An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under different curing regime for thermal analysis. *Energy and Buildings*, 138, 539-545.
- Naresh, B., & Saravanan, M. (2022).** Experimental study of replacement of cement with ground granulated blast furnace slag. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3493-3496.

- Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2015).** Modelling of compressive strength of geopolymer paste, mortar and concrete by optimized support vector machine. *Ceramics International*, 41(9), 12164-12177.
- Nelson, C. R. (2008).** *U.S. Patent No. 7,381,261*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ng, T. S., & Foster, S. J. (2013).** Development of a mix design methodology for high-performance geopolymer mortars. *Structural Concrete*, 14(2), 148-156.
- Nguyen, K. T., Le, T. A., Lee, J., Lee, D., & Lee, K. (2017).** Investigation on properties of geopolymer mortar using preheated materials and thermogenetic admixtures. *Construction and Building Materials*, 130, 146-155.
- Nguyen, T. H. Y., Tsuchiya, K., & Atarashi, D. (2018).** Microstructure and composition of fly ash and ground granulated blast furnace slag cement pastes in 42-month cured samples. *Construction and Building Materials*, 191, 114-124.
- Otis, L.M. (1960).** Perlite, in Mineral facts and problems, United States Bureau of Mines, Editor. United states Government Printing Office: Washington, WA. p. 581-587.
- Oymael, S. (2008).** Effects of Mgso₄ and Na₂so₄ solutions on concrete mortars from cement types Pkc 32.5 and Pc 42.5. *Engineering Sciences*, 3(2), 347-359.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016).** Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- Özkan, E., Canbakış, B., & Yılmaz, K. (2018).** Influence of expanded perlite aggregate on mechanical and durability properties of metakaolin based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 163, 19-26.
- Pal, S. C., Mukherjee, A., & Pathak, S. R. (2003).** Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and concrete research*, 33(9), 1481-1486.
- Palod, R., Deo, S. V., & Ramtekkar, G. D. (2020).** Effect on mechanical performance, early age shrinkage and electrical resistivity of ternary blended concrete containing blast furnace slag and steel slag. *Materials Today: Proceedings*, 32, 917-922.
- Pan, Z., Li, D., Yu, J., & Yang, N. (2003).** Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud–slag cementitious material. *Cement and concrete research*, 33(9), 1437-1441.
- Papadakis, V. G. (1999).** Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash. *Cement and concrete research*, 29(11), 1727-1736.
- Papadakis, V. G. (2000).** Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1647-1654.

- Parthiban, K., & Mohan, K. S. R. (2017).** Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 65-72.
- Patankar, S. V., Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2014).** Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar. *Indian journal of materials science*, 2014, 1-6.
- Pettifer, L. (1981).** Perlite-diversification the key to overall expansion.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Riddtirud, C., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2016).** Compressive strength, bending and fracture characteristics of high calcium fly ash geopolymer mortar containing portland cement cured at ambient temperature. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1263-1271.
- Phoo-Ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Riddtirud, C., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015).** High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and building materials*, 98, 482-488.
- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. (2015).** Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.
- Polat, K., & Perlit, G. (2007).** *Pomza ile Hava Sürükleyici Katkının Betonda Kılcal Geçirimsizlik ve Don Hasarına Etkisi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum).
- Rai, S., Bahadure, S., Chaddha, M. J., & Agnihotri, A. (2020).** Disposal practices and utilization of red mud (Bauxite Residue): A review in Indian context and abroad. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6(1), 1-8.
- Ramyar, K., & Inan, G. (2007).** Sodium sulfate attack on plain and blended cements. *Building and environment*, 42(3), 1368-1372.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2014).** Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials & Design*, 59, 532-539.
- Rautaray, S. K., Bera, D. K., & Rath, A. K. (2022, April).** The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending with Fly Ash Based Self Compacting Geopolymer Concrete on the Workability and Strength Properties at Ambient Curing. In *Recent Developments in Sustainable Infrastructure (ICRDSI-2020) —Structure and Construction Management: Conference Proceedings from ICRDSI-2020 Volume 1* (pp. 567-579). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Roulia, M., Chassapis, K., Kapoutsis, J. A., Kamitsos, E. I., & Savvidis, T. (2006).** Influence of thermal treatment on the water release and the glassy structure of perlite. *Journal of materials science*, 41, 5870-5881.

- Saggaff, A., & Mawarni, A. (2016).** Geopolymer mortar with fly ash. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 78, p. 01026). EDP Sciences.
- Saisuttichai, D., & Manning, D. A. (2007).** Geochemical characteristics and expansion properties of a highly potassic perlitic rhyolite from Lopburi, Thailand. *Resource geology*, 57(3), 301-312.
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A., & Chindaprasirt, P. (2012).** Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700-708.
- Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., & Pimraksa, K. (2009).** Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of hazardous materials*, 168(1), 44-50.
- Satya, Y. S. D., Saputra, E. D. Y., & Olivia, M. O. N. I. T. A. (2016, February).** Performance of blended fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar in acidic peat environment. In *Materials Science Forum* (Vol. 841, pp. 83-89). Trans Tech Publications Ltd.
- Saunders, E. (1979).** Agglomerating particulate perlite. US.
- Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., & Zajac, M. (2015).** Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 55, 374-382.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011).** Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676.
- Sengul, O., Tasdemir, C., & Tasdemir, M. A. (2002).** Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal-and high-strength concretes. *Materials Journal*, 99(6), 528-533.
- Sersale, R., Burriesci, N., Pino, L., & Bart, J. C. (1984).** Iron distribution in some Italian tuffs. *Materials Letters*, 3(1-2), 51-57.
- Shadnia, R., Zhang, L., & Li, P. (2015).** Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. *Construction and building materials*, 84, 95-102.
- Shah, S. P., Sharma, A., & Singh, R. (2021).** Effect of expanded perlite aggregate on capillary permeability of geopolymer mortar. *Materials Today: Proceedings*, 43, 236-240.
- Shao, N., Tang, S., Liu, Z., Li, L., Yan, F., Liu, F., ... & Zhang, Z. (2018).** Hierarchically structured calcium silicate hydrate-based nanocomposites derived from steel slag for highly efficient heavy metal removal from wastewater. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14926-14935.

- Sheng, G., Zhai, J., Li, Q., & Li, F. (2007).** Utilization of fly ash coming from a CFBC boiler co-firing coal and petroleum coke in Portland cement. *Fuel*, 86(16), 2625-2631.
- Shi, J., Tan, J., Liu, B., Chen, J., Dai, J., & He, Z. (2021).** Experimental study on full-volume slag alkali-activated mortars: Air-cooled blast furnace slag versus machine-made sand as fine aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123983.
- Shubbar, A. A., Jafer, H., Dulaimi, A., Hashim, K., Atherton, W., & Sadique, M. (2018).** The development of a low carbon binder produced from the ternary blending of cement, ground granulated blast furnace slag and high calcium fly ash: An experimental and statistical approach. *Construction and Building Materials*, 187, 1051-1060.
- Siddique, R., & Bennacer, R. (2012).** Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29-34.
- Siddique, S., Kim, H., & Jang, J. G. (2021).** Properties of high-volume slag cement mortar incorporating circulating fluidized bed combustion fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 289, 123150.
- Singh, M., & Garg, M. (1991).** Perlite-based building materials—a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 5(2), 75-81.
- Snelson, D. G., & Kinuthia, J. M. (2010).** Resistance of mortar containing unprocessed pulverised fuel ash (PFA) to sulphate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 523-531.
- Sperling, C. H. B., & Cooke, R. U. (1985).** Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(6), 541-555.
- Sreevidya, V., Anuradha, R., Thomas, T., & Venkatasubramani, R. (2013).** Durability Studies on Fly Ash Based Geopolymer Mortar Under in Ambient Curing Condition. *Asian Journal of Chemistry*, 25(5).
- SteinerOva, M. (2011).** Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure. *Ceramics-Silikáty*, 55(4), 362-372.
- Stevulova, N., Ondrejka Harbulakova, V., Estokova, A., Luptakova, A., & Repka, M. (2012).** Study of sulphate corrosion simulations on concrete composites. *International journal of energy and environment*, 6(2), 276-283.
- Stolper, E. (1982).** Water in silicate glasses: an infrared spectroscopic study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81, 1-17.
- Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., & Alnahhal, M. F. (2017).** Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar—A review. *Construction and Building Materials*, 148, 62-84.

- Suwan, T., & Fan, M. (2014).** Influence of OPC replacement and manufacturing procedures on the properties of self-cured geopolymer. *Construction and Building Materials*, 73, 551-561.
- Şen, Ö., & Tuncan, M. (2017).** The effect of magnesium sulphate on the properties of fly ash-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 154, 1187-1195.
- Taherishargh, M., Belova, I. V., Murch, G. E., & Fiedler, T. (2014).** Low-density expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials Science and Engineering: A*, 604, 127-134..
- Tasdemir, C., Sengul, O., & Tasdemir, M. A. (2017).** A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Energy and Buildings*, 151, 469-475.
- Temuujin, J., van Riessen, A., & MacKenzie, K. J. D. (2010).** Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building materials*, 24(10), 1906-1910.
- Thaarrini, J., & Venkatasubramani, R. (2015).** Feasibility studies on compressive strength of ground coal ash geopolymer mortar. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 59(3), 373.
- Thokchom, S., Dutta, D., & Ghosh, S. (2011).** Effect of incorporating silica fume in fly ash geopolymers. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 5(12), 750-754.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009).** Acid resistance of fly ash based geopolymer mortars. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 36.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010).** Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010).** Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40.
- Topçu, İ. B., & Işıkdağ, B. (2007).** Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*, 42(10), 3540-3546.
- Topçu, İ. B., & Işıkdağ, B. (2008).** Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of materials processing technology*, 204(1-3), 34-38.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Schwartzman, A. (1999).** The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. *Minerals Engineering*, 12(1), 75-91.

- Vasconcelos, E., Fernandes, S., De Aguiar, J. B., & Pacheco-Torgal, F. (2011).** Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3213-3221.
- Verma, A., Kore, R., Corbin, D. R., & Shiflett, M. B. (2019).** Metal recovery using oxalate chemistry: a technical review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(34), 15381-15393.
- Vuk, T., Gabrovšek, R., & Kaučič, V. (2002).** The influence of mineral admixtures on sulfate resistance of limestone cement pastes aged in cold MgSO₄ solution. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 943-948.
- Wang, B., Smith, T. R., Masters, A. L., & Danvers, N. J. K. (2009).** U.S. Patent No. 7,497,903. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., & Chen, Z. (2017).** Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 147, 398-406.
- Wang, E., Ni, W., & Sun, H. (2005).** The principle and development of the technique for preparing industrial slags-based geopolymer. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2(2), 30-34.
- Wang, H. Y., Wang, W. C., Wang, J. C., & Chen, Y. W. (2021).** Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag. *Construction and Building Materials*, 280, 122498.
- Wang, M., & Liu, X. (2021).** Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124420.
- Wang, M., & Liu, X. (2021).** Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124420.
- Wang, Q., Sun, S., Yao, G., Wang, Z., & Lyu, X. (2022).** Preparation and characterization of an alkali-activated cementitious material with blast-furnace slag, soda sludge, and industrial gypsum. *Construction and Building Materials*, 340, 127735.
- Wang, Q., Yan, P., & Mi, G. (2012).** Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. *Construction and building materials*, 35, 8-14.
- Wang, S., Jin, H., Deng, Y., & Xiao, Y. (2021).** Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125136.
- Warid Wazien, A. Z., Al Bakri, A. M., Abd Razak, R., Mohd Arif Zainol, M. R. R., Mohd Tahir, M. F., & Kamarudin, H. (2016, June).** Potential of geopolymer mortar as

concrete repairing materials. In *Materials Science Forum* (Vol. 857, pp. 382-387). Trans Tech Publications Ltd.

Wazien, A. W., Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Rozainy, M. M. R., & Tahir, M. F. M. (2016, June). Strength and density of geopolymers cured at ambient temperature for use as repair material. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 133, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.

World Business Council for Sustainable Development. (2012). The cement sustainability initiative. 10 years of progress-moving on to the next decade.

Xu, C., Ni, W., Li, K., Zhang, S., & Xu, D. (2021). Activation mechanisms of three types of industrial by-product gypsums on steel slag-granulated blast furnace slag-based binders. *Construction and Building Materials*, 288, 123111.

Xu, Y., Liu, X., Zhang, Y., Tang, B., & Mukiza, E. (2019). Investigation on sulfate activation of electrolytic manganese residue on early activity of blast furnace slag in cement-based cementitious material. *Construction and Building Materials*, 229, 116831.

Xu, Z., Gao, J., Zhao, Y., Li, S., Guo, Z., Luo, X., & Chen, G. (2022). Promoting utilization rate of ground granulated blast furnace slag (GGBS): Incorporation of nanosilica to improve the properties of blended cement containing high volume GGBS. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130096.

Xue, Y., & Liu, X. (2021). Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Chemical Engineering Journal*, 420, 130349.

Yan, S., & Sagoe-Crentsil, K. (2012). Properties of wastepaper sludge in geopolymers mortars for masonry applications. *Journal of environmental management*, 112, 27-32.

Yanev, Y., & Yordanov, Y. (1991). REE, TH, U, HF, SC, CO AND TA IN CAESIUM-BEARING PERLITES, ADULARITES AND ZEOLITITES FROM THE EASTERN RHODOPE. *Dokladi na B lgarskata akademiâ na naukite*, 44(4), 71-74.

Yang, S., Zhongzi, X., & Mingshu, T. (1996). The process of sulfate attack on cement mortars. *Advanced Cement Based Materials*, 4(1), 1-5.

Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in civil engineering*, 2011.

Yilmazer, S., & Ozdeniz, M. B. (2005). The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates. *Building and Environment*, 40(3), 311-318.

Yingliang, Z., Jingping, Q., Zhengyu, M. A., Zhenbang, G., & Hui, L. (2020). Effect of superfine blast furnace slags on the binary cement containing high-volume fly ash. *Powder Technology*, 375, 539-548.

- Yliniemi, Paiva, Ferreira, Tiainen, & Illikainen. (2017).** Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 131, 784-792.
- Yodsudjai, W., Suwanvitaya, P., Pikulprayong, W., & Taweessappaiboon, B. (2010).** *Testing of geopolymer mortar properties for use as a repair material* (Vol. 215, pp. 325-334). American Ceramic Society, Inc.
- Yoon, H. N., Seo, J., Kim, S., Lee, H. K., & Park, S. (2021).** Hydration of calcium sulfoaluminate cement blended with blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 268, 121214.
- Yu, C., Sun, W., & Scrivener, K. (2015).** Degradation mechanism of slag blended mortars immersed in sodium sulfate solution. *Cement and Concrete Research*, 72, 37-47.
- Yu, L. H., Ou, H., & Lee, L. L. (2003).** Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 73-76.
- Yuksel, I. (2018).** Blast-furnace slag. In *Waste and supplementary cementitious materials in concrete* (pp. 361-415). Woodhead Publishing.
- Yusuf, M. O. (2015).** Performance of slag blended alkaline activated palm oil fuel ash mortar in sulfate environments. *Construction and Building Materials*, 98, 417-424.
- Yusuf, T. O., Ismail, M., Usman, J., & Noruzman, A. H. (2014).** Impact of blending on strength distribution of ambient cured metakaolin and palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Advances in Civil Engineering*, 2014.
- Zejak, R., Nikolić, I., Blečić, D., Radmilović, V., & Radmilović, V. R. (2013).** Mechanical and microstructural properties of the fly-ash-based geopolymer paste and mortar. *Materiali in tehnologije*, 47(4), 535-540.
- Zeng, Q., Liu, X., Zhang, Z., & Xu, C. C. (2023).** Synergistic utilization of blast furnace slag with other industrial solid wastes in cement and concrete industry: synergistic mechanisms, applications, and challenges. *Green Energy and Resources*, 100012.
- Zhang, J., Li, S., & Li, Z. (2020).** Investigation the synergistic effects in quaternary binder containing red mud, blast furnace slag, steel slag and flue gas desulfurization gypsum based on artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122972.
- Zhang, N., Liu, X., Sun, H., & Li, L. (2011).** Evaluation of blends bauxite-calcination-method red mud with other industrial wastes as a cementitious material: Properties and hydration characteristics. *Journal of hazardous materials*, 185(1), 329-335.
- Zhang, S. Z., & Gong, K. C. (2003).** Geopolymer. *Cailiao Kexue yu Gongcheng (Materials Science and Engineering) (China)*, 21, 430-436.
- Zhang, W., Hao, X., Wei, C., Zeng, Q., Ma, S., Liu, X., ... & Webeck, E. (2022).** Synergistic enhancement of converter steelmaking slag, blast furnace slag, Bayer red mud

in cementitious materials: Strength, phase composition, and microstructure. *Journal of Building Engineering*, 60, 105177.

Zhang, W., Liu, X., Zhang, Z., Li, Y., Gu, J., Wang, Y., & Xue, Y. (2022). Circulating fluidized bed fly ash-blast furnace slag based cementitious materials: Hydration behaviors and performance. *Construction and Building Materials*, 342, 128006.

Zhang, Y., Liu, X., Xu, Y., Tang, B., & Wang, Y. (2020). Preparation of road base material by utilizing electrolytic manganese residue based on Si-Al structure: Mechanical properties and Mn²⁺ stabilization/solidification characterization. *Journal of hazardous materials*, 390, 122188.

Zhang, Y., Yu, P., Pan, F., & He, Y. (2018). The synergistic effect of AFt enhancement and expansion in Portland cement-aluminate cement-FGD gypsum composite cementitious system. *Construction and Building Materials*, 190, 985-994.

Zhutovsky, S., & Douglas Hooton, R. (2017). Experimental study on physical sulfate salt attack. *Materials and Structures*, 50(1), 54.

Zhutovsky, S., & Hooton, R. D. (2017). Accelerated testing of cementitious materials for resistance to physical sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 145, 98-106.

Zielinski, R. A., Lipman, P. W., & Millard, H. T. (1977). Minor-element abundances in obsidian, perlite, and feldspar of calc-alkalic rhyolites. *American Mineralogist*, 62(5-6), 426-437.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer Safa GÜR

Eğitim Durumu :

Lisans : 2020, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum: Malatya Büyükşehir Belediyesi İnşaat Mühendisi

